Universidad de Santiago de Compostela
Facultad de Ciencias de la Educación
Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales

ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA QUÍMICA EN EL BACHILLERATO. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA UNIDAD DIDÁCTICA

Tesis Doctoral, *Volumen A*

Iria Pereira García

Santiago de Compostela, año 2015

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DAS CIENCIAS EXPERIMENTALES

ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA QUÍMICA EN EL BACHILLERATO. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA UNIDAD DIDÁCTICA

Firma de la autora: Iria Pereira García

Memoria de Tesis Doctoral

presentada en la ***Universidad de Santiago de Compostela*** para optar al Grado de Doctor en Ciencias de la Educación

Iria Pereira García

Santiago de Compostela, noviembre de 2015

O DR. JOSÉ MANUEL DOMÍNGUEZ CASTIÑEIRAS, PROFESOR E INVESTIGADOR *AD HONOREM* DA UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

FAI CONSTAR:

Que o traballo de investigación que se recolle na memoria titulada

Ensino da Termodinámica Química no Bacharelato. Deseño, implementación e avaliación dunha unidade didáctica,

foi realizado baixo a súa dirección pola licenciada en Ciencias Químicas, Dna. Iria Pereira García, no Departamento de Didáctica das Ciencias Experimentais da USC, e que, de acordo co artigo 33 do Regulamento de estudos de Doutoramento, valora positivamente e autoriza a súa presentación como Tese de Doutoramento para a obtención do grao de Doutor por parte da interesada.

Santiago, 5 de novembro de 2015

Firmado: D. José Manuel Domínguez Castiñeiras (director da Tese)

A DRA. BLANCA PUIG MAURIZ, PROFESORA DA UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA,

FAI CONSTAR:

Que o traballo de investigación que se recolle na memoria titulada

Ensino da Termodinámica Química no Bacharelato. Deseño, implementación e avaliación dunha unidade didáctica,

foi realizado baixo a súa titoría pola licenciada en Ciencias Químicas, Dna. Iria Pereira García, no Departamento de Didáctica das Ciencias Experimentais da USC, e que, de acordo co artigo 33 do Regulamento de estudos de Doutoramento, valora positivamente e autoriza a súa presentación como Tese de Doutoramento para a obtención do grao de Doutor por parte da interesada.

Santiago, 10 de novembro de 2015

Firmado: Dna. Blanca Puig Mauriz (titora da Tese)

PRÓLOGO A LOS AGRADECIMIENTOS

Parece que, cuando uno redacta la Memoria de Tesis, contrae la obligación tácita de incluir en la cabecera del librote un apartado de agradecimiento a quienes lo han ayudado o animado en la realización de su trabajo.

Pero, antes de empezar, quiero que el lector sepa que estos ***Agradecimientos*** no responden en absoluto a protocolos o rutinas, como tampoco lo han hecho las circunstancias en las que he tenido que elaborar este trabajo de investigación.

«Uno es uno y sus circunstancias», y he aquí las mías. Al terminar esta Tesis, por fin quedo liberada de uno de los fantasmas de mi existencia pasada, y dejo en manos del lector esta breve confesión vital de una autora que no lo es por acaso, sino por *até*, y parece estar curándose.

Ahora, mientras pergeño el borrador de este epígrafe, lo escribo a mano; ya transcribiré a letra de imprenta la versión definitiva. Ha pasado casi una hora desde que me senté ante el ordenador, abrí un documento de *Word* en blanco, y… esperé. Por alguna razón que ahora no consigo recordar, estaba convencida de que las ideas acudirían a mí sin necesidad de esfuerzo ni voluntad. Tiene su lógica: tras decenas de decenas de páginas… ¿me dolerían las neuronas por añadir una carilla?

Pero el dolor de neuronas apareció. Tenía que aparecer, porque ahí estaba yo *otra vez* ante una página inicial en blanco, y *otra vez* mirando ese cursorcito parpadeante, y *otra vez* me daba vértigo recordar cuánto tiempo había pasado desde el inicio de la Tesis. Y así pasó que, en menos de quince minutos, mi redacción no había coleccionado más que un puñado de jirones absurdos que más se emborronaban cuanto más los intentaba hilvanar.

Total, que borré de un plumazo (*Supr*, *Supr*, *Supr*) todos los jirones, y dediqué unos cuantos minutos a lo que se me dio en llamar "pensarlo seriamente", o, hablando en plata, fruncir y desfruncir el ceño y dejar vagar el puntero sobre el reloj de la barra de tareas, esperando a que las tan cacareadas ideas se decidieran a acudir en mi ayuda. Pero, por supuesto, no hicieron acto de presencia.

Después de levantarme y prepararme una tila, resolví que en esta ocasión no era la montaña la que debía moverse. Así que volví a mi mesa, relegué el ordenador al modo de hibernación, lo arrinconé donde no me molestara, y tomé tres papeles "tiñosos", de esos que están impresos por una cara, y que sirven para un roto y para un descosido, y también para romper y descoser lo que se tercie.

¿Estructura del epígrafe ***Agradecimientos***? La que tuviera a bien surgir sobre la marcha, que ya lo reformaría después. ¿Tema y variaciones? La lista de gente a la que puedo agradecer cualquier cosa en estos años de desventuras. ¿Ordenación final del epígrafe? Bueno, aquí tengo que añadir una última aclaración: el orden

definitivo responderá a la disposición peregrina que se me vaya ocurriendo para que la composición de los párrafos de este borrador no se desvíe demasiado de los cauces habituales de las Memorias de Tesis.

Estos años he vivido mi propia odisea. O, mejor dicho, he sobrevivido a ella. Bueno, el caso es que, ahora que termina, ya puedo cribar la paja y quedarme con el grano que se ha salvado del pedrisco.

Gracias a haber realizado este trabajo de investigación he conocido a personas maravillosas, que me han enseñado a aprender mucho más de lo que esperaba, y a desaprender lo que tal merecía, para que no pesara sobre mis hombros. He logrado cosas que jamás creí que llegaría a hacer, y con los pies sobre la tierra, me he propuesto otras que solamente había conocido como lejanas hipótesis que solamente podía plantearme en sueños, y que únicamente podrían haberse materializado en el improbable caso de que el pasado pudiera volver y el futuro no fuera un largo pasado y en fin, y a ver, y "vaya que ya va y ya hay que irse yendo", y "*sine qua non*", y "bueno ya se hará camino". También he bajado a las fosas abisales, y he vuelto a la superficie a pesar de las diferencias de presión y luz y temperatura… y de la presencia de bastantes pelágicos indeseados. Además, he continuado leyendo sin descanso ni cansancio más y más libros magníficos, y he aprendido a descifrar pergaminos, y a interpretar la *fortuna*, que tiene una sola línea pero se puede leer entre ella. Y por si fuera poco –oh prodigio de un topo arúspice– he visto a mis Manes emerger de la tierra ¡y todavía me cuento entre los vivos!

AGRADECIMIENTOS

Dicho esto, es para mí un placer expresar mi agradecimiento a aquellos que me han apoyado a lo largo de esta etapa de Tesis. Quienes figuran en los ***Agradecimientos*** no lo hacen porque la fórmula obligue a ello, sino porque han contribuido a hacer mejores las buenas experiencias y a aliviar las malas.

En primer lugar, me gustaría agradecer la colaboración activa de quienes han revisado, comentado y alentado la marcha de la investigación:

A José Manuel Domínguez Castiñeiras, director de esta Tesis. En primer lugar, por ser insuperable en su labor. Con sus amplísimos conocimientos y su inagotable paciencia, en estos años de trabajo ha sido un inmejorable director de investigación, y me ha regalado una relación personal muy gratificante. Además, por su implicación personal y buen carácter, ha logrado algo por lo que yo no apostaba cuando entré en el Departamento: no me arrepiento de haberme embarcado en la aventura de la investigación en Didáctica de las Ciencias.

A Rodrigo Montes Rodríguez, por su desinteresada y entusiasta colaboración en la implementación de las unidades didácticas que se analizan en

este trabajo. ¡Quién me iba a decir que mi profesor de *Química* de 2º de Bachillerato habría de participar en la parte experimental de mi Tesis! También tengo que dar las gracias a los once alumnos que cursaron Química de 2º de Bachillerato en el IES *Fernando Esquío* (curso 2008-2009), por su cooperación en la toma de datos y su confianza en Rodrigo y en los materiales que pusimos a su disposición. Y agradezco a todos los profesores del IES su buena voluntad, su participación en las entrevistas y la calurosa acogida que dieron a esta ex-alumna que estuvo varias semanas paseándose por el centro como Perico por su casa para hacer su "famosa tesis".

A mi prima Irene García García, por su perenne buen humor que ningún otoño puede deslucir, por los estupendos martes-miércoles, y por los consejos que me ha dado para la impresión y encuadernación de esta Tesis.

También tengo que agradecer su ánimo a los integrantes del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la USC.

Además de a quienes se implicaron en el trabajo que me ha ocupado estos últimos años, quiero dar gracias también a los que, sin tener nada que ver con la Tesis, la han soportado en mayor o menor medida, y siempre con gran paciencia:

A mis padres y a mi hermano Manuel, que tienen el mérito de haber aguantado en casa a ese intruso llamado Tesis. Mientras yo me peleaba con el tal intruso para sacar algo en limpio, mi familia no dejó de animarme aun cuando me veía sudar tinta, dormirme por las esquinas, blasfemar en arameo… y un largo etcétera de peripecias que serían muy enojosas de relatar en un epígrafe tan solemne. También agradezco su compañía a Patri, alias *Doña Corleone*, que todo lo alborota a todas horas. A mi tío Chente, que además de tío es maestro y de los mejores, y a mis primos Irene, Chente y Conchi, que me han animado y apoyado en lo que respecta a este trabajo, y más allá también.

A mis dos grandes amigas, Bita (por cierto, otra maestra) y Mónica, que durante estos años me vieron metamorfosearme sucesivamente en una gnomo minera con linterna sorda y con toda la alevosía y la premeditación de la piqueta que apunta al grisú; en el famoso *peridinium notatum* del *totus meus*; en un *melanocetus johnsonii* con luz y dientes del abismo más abisal; y con gran alivio me han visto reconvertirme en la marmota de siempre, que no lanza madera porque ya ha lanzado toda la del mundo. Cierto que es gaje del oficio de amigo asistir estoicamente a estas metamorfosis, pero no es moco de pavo sostener largas conversaciones filosóficas nocturnas con una extraña representante de la fauna abisal que lleva los calcetines caídos por los tobillos, y cuyo metabolismo no admite más café. («¡Tu-tu-tu-tu, y una vuelta más!»)

Inciso: A mis compañeras *de toda la vida*, vaya mi agradecimiento en relación directamente proporcional a su compañerismo.

Para terminar, no puedo olvidar en mis ***Agradecimientos*** a aquellos que, sin tener nada que ver con la Tesis ni haber sufrido su desarrollo, con su dedicación y ánimo han hecho posible que hoy este trabajo pueda ver la luz:

A mis alumnos, que me han acompañado durante los tres últimos años de esta extraña aventura.

A todos los buenos profesores que he tenido en mi vida; son tantos, que no puedo enumerarlos a todos sin aburrir al lector. Aunque, en realidad, no hace falta que los nombre, porque ellos ya saben quiénes son. ¡Gracias por todo! Solamente me permitiré citar a los dos que más me han enseñado:

«Todo está en los libros; y lo que todavía no está, se puede escribir cuando se quiera.» Gracias, Juan, por esta gran verdad, y por todas las demás. Gracias por ser el mejor profesor de mi infancia. Al margen de lo académico, me ayudaste a conservar siempre el interés por el universo y las ganas de seguir adelante, de saber más y disfrutar de ello. Y estas ideas fueron un faro de luz en el tenebroso y hediondo pantano de los dos cursos que tuve que sufrir con aquélla de cuyo nombre todavía no quiero acordarme.

«Todas las artes se resumen en la literatura.» Sería poco darle las gracias por sus enseñanzas, Don Emilio, y por esto le dedico la presente obra, que hasta la fecha es la mayor que he terminado y la que más esfuerzos me ha costado. He de confesarle que, si me obligaran a hacer alusión a un único profesor en los ***Agradecimientos***, me sería imposible citarlo a usted, porque mi director de Tesis ha hecho merecimientos más que sobrados para ocupar el puesto de honor. Pero quien me hizo el regalo más preciado que un profesor puede hacer a un alumno, ése fue usted. No sabría decir cuál fue mi mejor maestro; pero sí cuál me hizo ver quién soy y hacia dónde quiero, puedo, sé y debo ir. Gracias a Usted, Don Emilio, a mis once años de edad yo ya tenía un objetivo en la vida que era a la vez la meta y el fin en sí, y a nadie más debo esta merced.

Al *Programa María Barbeito de axudas a contratos predoutorais de formación de doutores para a súa incorporación en organismos públicos e privados de investigación da Comunidade Autónoma de Galicia* (código IN840C) – *Recursos Humanos do Plan Galego de Investigación, Desenvolvemento e Innovación Tecnolóxica, INCITE* (2006-2010) convocatoria del año 2007.

CITAS CIENTÍFICAS

«Una teoría es tanto más grandiosa cuanto mayor es la sencillez de sus premisas, cuanto más variadas las cuestiones que relaciona y cuanto más amplio el ámbito de su aplicación. De aquí la profunda impresión que produjo en mí la Termodinámica Clásica. Es la única teoría física universal por su contenido de la que, dentro del esquema de aplicación de sus conceptos fundamentales, estoy convencido que jamás será desechada.»

(A. Einstein)

«Dios no juega a los dados con el Universo.»

(A. Einstein)

«Es cuestión de experiencia común, saber que las cosas tienden al desorden y al caos a medida que pasa el tiempo. Esta observación puede elevarse al estado de ley, la así llamada Segunda Ley de la Termodinámica. Esta dice que la cantidad total de desorden, o entropía, en el universo, aumenta siempre con el tiempo. Sin embargo, la ley se refiere solamente a la cantidad total de desorden. El orden en un cuerpo puede aumentar, a condición de que la cantidad de desorden a sus alrededor aumente en una cantidad mayor. Esto es lo que sucede con un ser vivo. Podríamos definir a la vida como: sistema ordenado que puede sostenerse contra la tendencia al desorden, y que puede reproducirse. Es decir, que puede formar sistemas ordenados similares, pero independientes. Para hacer estas cosas, el sistema debe poder convertir energía partiendo de una forma ordenada, (por ejemplo: alimento, luz del sol, o energía eléctrica), en energía desordenada, (en forma de calor). De esta manera, el sistema puede satisfacer el requisito de que la cantidad total de desorden aumente, mientras que, al mismo tiempo, aumenta el orden en sí mismo y en su descendencia.»

Conferencia *La vida en el universo* (S. Hawking)

«Es importante darse cuenta de que en la Física actual no sabemos lo que es la energía. No tenemos un modelo de energía formada por pequeñas gotas de un tamaño definido. No es así. Sin embargo, hay fórmulas para calcular cierta cantidad numérica y cuando las sumamos todas siempre encontramos el mismo número.»

(R. Feynman)

«Si medimos el desorden por el número de maneras en que podemos disponer las cosas internamente de modo que parezca lo mismo desde el exterior, la entropía es el logaritmo de ese número de maneras.»

(R. Feynman)

«Los objetivos y actitudes adoptados por Carnot y Boltzmann compendian la termodinámica. Carnot viajó hacia la termodinámica desde el mundo de las máquinas, símbolo de la sociedad industrial de su época, y pretendió mejorar su rendimiento. Boltzmann, en cambio, lo hizo desde el átomo, símbolo del naciente fundamentalismo científico: buscó dilatar nuestra comprensión del mundo hasta los niveles más profundos. La termodinámica sigue abarcando hoy ambos enfoques y refleja objetivos, actitudes y aplicaciones complementarias. Nacida de la tosca máquina, ha adquirido tal refinamiento que se ha convertido en instrumento de exquisita delicadeza. Ocupa todos los ámbitos de interés humano y cubre la organización y el despliegue de ideas y recursos, en particular de las ideas acerca de la naturaleza del cambio en el mundo que nos rodea. Pocas contribuciones han enriquecido tanto nuestro conocimiento como esta hija de la máquina de vapor y del átomo.»

The 2nd Law, Capítulo 1 (R. W. Atkins)

«*At thermal equilibrium the systems appear to be at rest, and the net change is quenched. But in fact the Demon is as active as ever. Boltzmann's Demon never dies; it escurries furiously and randomly from atom to atom, extinguishing here and igniting there.*»

The enumeration of chaos, en *The 2nd Law* (R. W. Atkins)

CITAS LITERARIAS

Volvió al Ateneo, y… nada, todos los días lo mismo.

No había Metafísica; no había que darle vueltas. Es más, un periódico muy grande, a quien perseguía mucho el Gobierno por avanzado, publicaba artículos satíricos contra los ostras que creían en la psicología vulgar, y los equiparaba a los reaccionarios políticos.

Zurita empezó a no ver claro en lo Absoluto.

Por algo él no encontraba el Ser dentro de sí, antes del límite, etc., etc.

«¿Sería verdad que no había más que hechos?

»Por algo lo dirían aquellos señoritos que habían estudiado en París, y los otros que sabían o decían saber, termodinámica.»

Zurita –IV (Leopoldo Alas, *Clarín*)

¿Recordáis el fin de aquel *Cántico del gallo salvaje*, que en prosa escribiera el desesperado Leopardi, el víctima de la razón, que no logró llegar a creer? «Tiempo llegará -dice- en que este Universo y la Naturaleza misma se habrán extinguido. Y al modo de grandísimos reinos e imperios humanos y sus maravillosas acciones que fueron en otra edad famosísimas, no queda hoy ni señal ni fama alguna, así igualmente del mundo entero y de las infinitas vicisitudes y calamidades de las cosas creadas no quedará ni un solo vestigio, sino un silencio desnudo y una quietud profundísima llenarán el espacio inmenso. Así este arcano admirable y espantoso de la existencia universal, antes de haberse declarado o dado a entender, se extinguirá y perderáse.» A lo cual llaman ahora, como un término científico y muy racionalista, la entropía. Muy bonito, ¿no? Spencer inventó aquello del homogéneo primitivo, del cual no se sabe cómo pudo brotar heterogeneidad alguna. Pues bien; esto de la entropía es una especie de homogéneo último, de estado de perfecto equilibrio. Para una alma ansiosa de vida, lo más parecido a la nada que puede darse.

En el fondo del abismo, en *Del sentimiento trágico de la vida* (Miguel de Unamuno)

¿Hemos de concluir, pues, que el verdadero Stendhal es un Stendhal en negativo, que debe buscarse sólo en las decepciones, en los descalabros, en las pérdidas? No es así: el valor que Stendhal quiere afirmar es siempre el de la tensión existencial que surge cuando se mide la propia especificidad (los propios límites) con la especificidad y los límites del ambiente. Justamente porque la existencia está dominada por la entropía, por la disolución en instantes y en impulsos como corpúsculos sin nexo ni forma, quiere que el individuo se realice según un principio de conservación de la energía, o mejor de reproducción continua de cargas energéticas.

Imperativo tanto más riguroso cuanto más cerca está Stendhal de comprender que de todos modos la entropía triunfará al fin, y que del universo con todas sus galaxias no quedará más que un remolino de átomos en el vacío.

El conocimiento pulviscular en Stendhal, en *Por qué leer los clásicos* (Italo Calvino)

MARÍA VASÍLIEVNA (*a su hijo.*) […] Te olvidaste de que, por sí solas, las convicciones no son nada más que letra muerta… Hay que reforzarlas con la acción.

VOINITSKI. ¿Con la acción? Todo el mundo no puede ser un *perpetuum mobile* escribiente como su *herr* profesor.

El tío Vania –Acto I (A. P. Chéjov)

OTRAS CITAS REPRESENTATIVAS DEL IMPACTO DE LA TERMODINÁMICA EN NUESTRO UNIVERSO CULTURAL

PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA: No puedes ganar.
SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA: No puedes empatar.
TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA: No puedes abandonar el juego.

(*Vox populi*)

1ST LAW OF HACKING: leaving is much more difficult than entering.
2ND LAW OF HACKING: first in, first out.
3RD LAW OF HACKING: the last blow counts most.
4TH LAW OF HACKING: you will find the exit at the entrance.

Los principios de la Termodinámica en el mundo de *NetHack*

(*Stichting Mathematisch Centrum & M. Stephenson.*
http://www.nethack.org/)

IN MEMORIAM:

Esta Tesis está dedicada a dos seres muy queridos para mí, cuyo recuerdo me emocionará siempre. Sé que se han ido, pero… será su poesía recibida de todo el pueblo, en todo el universo, y gozarán de eterna fama y vida:

A *Chiqui*, por su carácter bondadoso, dulce y alegre; por haber sido él mismo siempre, y por haberlo sido para mí. Sigues vivo en mi recuerdo, infatigable, y libre como nunca, y a veces me parece que te veo allá a lo lejos, al otro lado de la Estigia, corriendo con tu elegante galope por los Campos Elíseos, llevando felicidad a quienquiera que la necesite. Y dime, ¿allí también hay ovejas?

A Don Emilio Vilariño Vázquez, que tuvo razón desde el principio, y sigue teniendo razón.

Sepa el lector que D. Emilio, director del colegio *Jorge Juan* de Narón durante años, y mi profesor de Lengua y Literatura Castellana entre 6º y 8º de EGB, me enseñó morfología, sintaxis… y algo que le agradeceré toda la vida: me reveló mi vocación por leer, leer y leer.

Gracias, Don Emilio, por tantas y tantas cosas: por mostrarme la biblioteca y abrirla fuera de horario para mí; por llevarme de la mano a lo largo y ancho de la historia de la Literatura; por guiar atenta y discretamente mis lecturas; por no reñirme demasiado aunque le exasperase mi manía de sentarme a leer en el suelo como una "bárbara"; y como si fuera poco, por intentar "desfacer entuertos" más allá de lo posible. Ahora, por fin puedo responder a sus desvelos con esta dedicatoria, y pronto estaré en condiciones de virar sobre el ancla y arrojar el entuerto al río del olvido, donde se hundirá definitivamente.

Qué sucederá después, no lo sé. En todo caso, nada se habrá perdido, y, aunque más males vengan,

«cabalgaré sobre la pesadilla pero llevaré las riendas.»

(G. K. Chesterton)

PRESENTACIÓN DE LA MEMORIA DE TESIS DOCTORAL: *VOL. A* Y *VOLs. B_1* y *B_2*

La presente Memoria de Tesis Doctoral se compone de tres volúmenes:

- el ***Volumen A*** o monográfico, correspondiente a la parte teórica de la investigación (***primera parte***), donde se plantea y desarrolla la investigación que ha conducido a la elaboración de esta Memoria, y
- los ***Volúmenes B_1 y B_2*** o prácticos, donde se recogen la parte experimental (***segunda parte***), las conclusiones y bibliografía (***tercera parte***) y los anexos.

Para agilizar la consulta de la información contenida en la Memoria, a continuación se ofrece una lista completa de las tres partes con sus capítulos correspondientes. Tanto las partes como los capítulos contienen índices cuya finalidad es facilitar la lectura selectiva del contenido.

VOLUMEN A

PRIMERA PARTE: PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Capítulo I: Marco teórico de la investigación

Capítulo II: Estrategia de investigación

VOLUMEN B_1

SEGUNDA PARTE: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN (…)

Capítulo III: Valoración del conocimiento construido durante la fase previa

Capítulo IV: Valoración del conocimiento inicial de los estudiantes (caracterización inicial)

VOLUMEN B_2

(…) SEGUNDA PARTE: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Capítulo V: Valoración del conocimiento construido durante la fase de intervención

Capítulo VI: Valoración del conocimiento final de los estudiantes (caracterización final)

Capítulo VII: Valoración del conocimiento de los estudiantes a medio plazo (retención)

TERCERA PARTE: CONCLUSIONES E IMPLICACIONES DE LA INVESTIGACIÓN. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Capítulo VIII: Conclusiones e implicaciones de la investigación

Bibliografía consultada

Anexos

RESUMEN

El principal propósito de esta Tesis es estudiar la efectividad de dos propuestas de enseñanza (sobre Termoquímica y sobre Termodinámica Química) en la evolución de las formas de pensar y hacer de una muestra de estudiantes de Bachillerato. Las propuestas, diseñadas por los investigadores, se ensayaron en una muestra formada por los once alumnos de una clase de 2º de Bachillerato que estudiaban Química con un profesor que colaboró en la investigación.

El diseño experimental del estudio incluye un *pre-test*, y dos *post-tests* para evaluar el conocimiento final inmediatamente después de la instrucción y dos meses después. El contraste entre *post-tests* permite determinar la significatividad del aprendizaje. También se examina la influencia del cambio metodológico sobre la evolución del conocimiento.

Para comprobar la evolución de los conocimientos, se han utilizado dos tipos de análisis cualitativo: los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los estudiantes a medida que resolvían las actividades de las unidades y las pruebas de *pre-test* y *post-tests*, y las competencias que desarrollaron. La evaluación de las competencias se ha realizado mediante un nuevo método de análisis, que se diseñó durante la investigación y que se ha evaluado por contraste con el análisis por esquemas de razonamiento y acción, cuya utilidad está respaldada por investigaciones previas.

Los resultados muestran una evolución significativa en los esquemas de razonamiento y de acción y en las competencias de los alumnos. Esto permite inferir la capacidad de las propuestas didácticas para propiciar cambios significativos en el conocimiento (conceptos, modelos, destrezas cognitivas…)

Los esquemas de razonamiento y acción y las competencias se han revelado como herramientas válidas para comprobar la efectividad de las propuestas ensayadas (en qué medida generan cambios significativos en el conocimiento), y constatar el aprendizaje generado (hasta qué punto los estudiantes han construido relaciones deseables).

PALABRAS CLAVE

Constructivismo social, Termoquímica, **Termodinámica Química**, **esquemas de razonamiento y acción**, **competencias científicas**.

ÍNDICE GENERAL DE LA MEMORIA

Esta Memoria de Tesis incluye tres índices para ayudar al lector a localizar en el texto la información más relevante. Los índices se organizan en dos bloques, cada uno contenido en un ***Volumen***. En el ***Volumen A*** se ofrecen un índice capitular y un índice de las tablas y figuras que ilustran el texto. Cada ***Volumen B*** (***B_1*** y ***B_2***) incluye sus propios índices. En el ***Volumen B_1*** se encuentran los ***Capítulos III*** y ***IV***, y en el ***Volumen B_2*** se incluyen los ***Capítulos V***, ***VI***, ***VII*** y ***VIII***, el índice de las referencias bibliográficas y los documentos anexos a la Memoria.

Índice capitular

INTRODUCCIÓN A LA MEMORIA DE TESIS vii

PRIMERA PARTE: Planteamiento y fundamentación de la investigación..... 1

I. Marco teórico de la investigación..... 1

I.1. Origen de la investigación 3

I.1.1. Motivaciones personales..... 3

I.1.2. Antecedentes de la investigación: el proyecto AcAb y su continuación en la actualidad..... 4

I.1.3. Concreción de la investigación: razones para investigar sobre la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos 7

I.1.4. Escenario de la investigación 10

I.2. Planteamiento de los problemas de investigación 11

I.2.1. Planteamiento del primer problema de investigación..... 12

I.2.2. Planteamiento del segundo problema de investigación..... 12

I.2.3. Planteamiento del tercer problema de investigación..... 13

I.3. Revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales .14

I.3.1. Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar 15

I.3.2. El proceso de aprendizaje en las Ciencias Experimentales 27

I.3.3. Implicaciones para la enseñanza de las Ciencias..... 61

I.3.4. La situación actual de la enseñanza de las Ciencias 92

I.3.5. Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias..... 118

I.4. Hipótesis de la investigación 253

I.4.1. Primera hipótesis de trabajo (HT_1)..... 254

I.4.2. Segunda hipótesis de trabajo (HT_2)..... 256

I.4.3. Tercera hipótesis de trabajo (HT_3)..... 257

I.5. Plan de trabajo 258

I.5.1. Fundamentos del plan de trabajo 258

I.5.2. Fases del plan de trabajo y cronología de la investigación..... 260

II. Estrategia de investigación..... 263

II.1. Sujetos, características y contexto de la muestra..... 265

II.2. Diseño experimental..... 274

II.2.1. Condicionantes del diseño experimental 274

II.2.2. Fases del diseño experimental 281

II.3. Variables implicadas en la investigación..... 286

II.3.1. Variables dependientes e intervinientes..... 287

II.3.2. Variable independiente: la metodología de enseñanza..... 289

Índices de tablas y figuras

Índice de tablas

Tabla 1: fases en las que se organiza la secuenciación y desarrollo de las actividades que conforman las propuestas didácticas Termoquímica y Termodinámica Química (adaptado de Ollerenshaw y Ricthie, 1997) 70

Tabla 2 listado de las competencias clave del Parlamento y el Consejo europeos, y de las competencias básicas del curriculum español correspondiente al desarrollo de la LOE 105

Tabla 3: datos relevantes de los alumnos de la muestra 269

Tabla 4: número de faltas de asistencia notificadas por el docente, y número de faltas justificadas por los padres de los alumnos, para el total de las sesiones de Química (116 horas) 270

*Tabla 5: número de faltas de asistencia observadas durante las fases previa (**Fp**) y de intervención (**Fi**), e indicación de asistencia (sí) o no asistencia (no) a las pruebas de caracterización inicial (**Ci**), final (**Cf**) y de retención (**Rt**)* 271

Tabla 6: estudio comparativo de las faltas de asistencia de Carlos, Berta, Diana y Débora entre el total del curso de Química y la fase experimental de la Tesis 272

Tabla 7: claves en el diseño experimental de la investigación 285

Tabla 8: relación de los contenidos relacionados con la Termoquímica y la Termodinámica Química para la materia Química de 2º de Bachillerato, según el R.D. 1467/2007 (MEC, 2007a) y el Decreto 126/2008 (XUGA, 2008) 315

Tabla 9: contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales seleccionados para las propuestas didácticas sobre Termoquímica y sobre Termodinámica Química 318

Tabla 10: significados macroscópico y microscópico de las variables termodinámicas temperatura T, presión p y volumen V del sistema 331

Tabla 11: objetivos de las secuencias didácticas ensayadas 447

Tabla 12: criterios de evaluación para las dos propuestas de enseñanza ensayadas 451

Tabla 13: Guion de la actividad Fp01 – descripción termodinámica de un sistema físico 476

Tabla 14: Guion de la actividad Fp02 – la energía en los sistemas termodinámicos 485

Tabla 15: Guion de la actividad Fp03 – descripción termodinámica de un sistema químico 487

Tabla 16: Guion de la actividad Fp04 – el móvil perpetuo de primera especie 490

Tabla 17: Guion de la actividad Fp05 – calor de reacción, a V = cte y a p = cte 495

Tabla 18: Guion de la actividad Fp06 – utilidades de la entalpía y de su variación 497

Tabla 19: Guion de la actividad Fp07 – para el trabajo de laboratorio, la planificación es lo primero 501

Tabla 20: Guion de la actividad Fp08 – determinación del calor de disolución del $NaOH_{(s)}$ 504

Tabla 21: Guion de la actividad Fp09 – determinación del calor asociado al proceso de neutralización entre $HCl_{(aq)}$ y $NaOH_{(aq)}$ 507

Tabla 22: Guion de la actividad Fp10 – un poco de orden para ΔH 510

Tabla 23: Guion de la actividad Fp11 – las leyes de la Termoquímica 512
Tabla 24: Guion de la actividad Fp12 – … y sin necesidad de recurrir al laboratorio 514
Tabla 25: Guion de la actividad Fp13 – dos productos de la combustión del carbón 517
Tabla 26: Guion de la actividad Fp14 – la "entalpía de enlace" 523
Tabla 27: balance energético microscópico de las reacciones propuestas en la actividad Fp14 529
Tabla 28: Guion de la actividad Fp15 – ¿"Quemando calorías"? 531
Tabla 29: Guion de la actividad Fi01 – exotermia y espontaneidad… 536
Tabla 30: Guion de la actividad Fi02 – (ir)reversibilidad 541
Tabla 31: Guion de la actividad Fi03 – la entropía y el segundo principio de la Termodinámica 542
Tabla 32: Guion de la actividad Fi04 – el móvil perpetuo de segunda especie 547
Tabla 33: Guion de la actividad Fi05 – entropía, desorden y probabilidad de los estados 550
Tabla 34: Guion de la actividad Fi06 – variaciones de entropía 557
Tabla 35: Guion de la actividad Fi07 – ordenando ideas… 561
Tabla 36: Guion de la actividad Fp08 – el criterio de espontaneidad G 564
Tabla 37: Guion de la actividad Fp09 – ΔG como criterio de espontaneidad y equilibrio 568
Tabla 38: Guion de la actividad Fp10 – piedra caliza (I) – estabilidad 572
Tabla 39: Guion de la actividad Fp11 – piedra caliza (II) – descomposición térmica 575
Tabla 40: Guion de la actividad Fp12 – piedra caliza (III) – el proceso de calcinación 577
Tabla 41: Guion de la actividad Fp13 – un poco de Termodinámica para la metalurgia 579
Tabla 42: datos termodinámicos de la actividad Fi13 580
Tabla 43: Guion de la actividad Fp14 – la termodinámica de las explosiones 584
Tabla 44: Guion de la actividad Fp15 – la síntesis de Haber 587
Tabla 45: datos termodinámicos de las sustancias implicadas en la reacción de Haber 588
Tabla 46: Guion de la actividad Fp16 – Termodinámica y Bioquímica 590

Índice de figuras

Figura 1: relación entre el mundo externo y la Ciencia (adaptado de Hertz, en Casella y Giuliani, 1999) 19

Figura 2: modelo de razonamiento científico (adaptado de Giere, en Driver, Newton y Osborne, 2000) 24

Figura 3: el proceso de transposición didáctica 25

Figura 4: finalidades de la ciencia escolar 26

Figura 5: papel de la investigación en el diseño y elaboración de estrategias de dirección de aula y planes de acción docente 66

Figura 6: relaciones que guardan las fases del plan de trabajo con la cronología de la investigación y con la ordenación capitular de la presente Memoria de Tesis 262

Figura 7: fases del diseño experimental de la investigación 282

Figura 8: ubicación de los grupos de alumnos en el aula de laboratorio 298

*Figura 9: distribución de las conexiones entre los esquemas **ER1**, **ER2**, **ER3**, **ER4** y **ER5** en el macroesquema de razonamiento **ERT*** 399

*Figura 10: distribución de las conexiones entre los esquemas **EA1**, **EA2**, **EA3**, **EA4** y **EA5** en el macroesquema de razonamiento **EAT*** 413

Figura 11: disgrama entálpico de la actividad Fp13 521

Figura 12: presión de CO_2 dentro del horno de la actividad Fi12 578

Figura 13: estructuras moleculares del TNT, la nitroglicerina y el PETN 586

INTRODUCCIÓN A LA MEMORIA DE TESIS

La presente Memoria está estructurada en ocho capítulos, a lo largo de los cuales se plantea y desarrolla el tema de la investigación de Tesis: la influencia de dos propuestas de enseñanza (sobre Termoquímica y sobre Termodinámica Química) en la evolución de las formas de pensar y hacer de una muestra de estudiantes de Bachillerato. Las propuestas, diseñadas por los investigadores y ensayadas en un contexto real de aula de Ciencias, se examinan por dos métodos:

En primer lugar, se determinan y evalúan los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los alumnos cuando desarrollaron las actividades planteadas. En segundo lugar, se realiza un análisis de las competencias que movilizaron los estudiantes al desarrollar las actividades. Este método de análisis del aprendizaje por competencias, que se diseñó en el marco de la presente investigación de Tesis, se valida por contraste con el análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción.

La ordenación capitular de la Memoria obedece a la estructura de la investigación y se inspira en las fases del modelo propuesto por Tuckman (1978). Así, en la primera parte se exponen el planteamiento y la fundamentación de la investigación. Esta parte está contenida en el presente ***Volumen A***, monográfico, y se compone de los ***Capítulos I*** y ***II***, dedicados, respectivamente, al marco teórico en que se encuadra la investigación, y a la estrategia de investigación. La segunda parte se recoge en los ***Volúmenes B***, experimentales, con los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII***, y se centra en la exposición, el análisis y la discusión de los resultados que se obtuvieron, y la tercera parte de la Memoria, en la que se recogen las conclusiones globales de la investigación (***Capítulo VIII***), la lista de las referencias bibliográficas y los anexos.

A continuación se resume el contenido concreto de los capítulos, organizados en las tres partes de que se compone la presente Memoria:

PRIMERA PARTE: Planteamiento y fundamentación de la investigación

Correspondiendo con la primera fase de la investigación (Tuckman, 1978), se contextualiza y justifica su problemática.

***Capítulo I*: Marco teórico de la investigación**

Para comenzar, se describe el origen de la investigación, haciendo explícitas las influencias que sobre la misma han tenido nuestra formación y nuestras motivaciones, la interacción con el profesorado en ejercicio y con una de las líneas de investigación del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la USC, las nuevas ideas que emanan de la investigación en enseñanza de las Ciencias y las reformas del sistema educativo, a partir de las cuales se elaboran los *curricula* oficiales en España y, como consecuencia, en Galicia.

En un segundo apartado, se plantean los problemas de investigación, derivados de nuestro convencimiento de que, para que se produzca un aprendizaje significativo de conceptos, modelos, procedimientos y actitudes, es fundamental que los estudiantes desarrollen estrategias de razonamiento y destrezas y técnicas de investigación que destaquen el carácter funcional del conocimiento científico.

Posteriormente, se realiza una revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales, encaminada a dos objetivos: profundizar en los problemas de la investigación de Tesis, y fundamentar y enunciar las hipótesis de trabajo que a partir de ellos se formulan. En el cuarto apartado de este capítulo se emiten las hipótesis de la investigación.

Finalmente se establece el plan de trabajo que se elaboró para contrastar las hipótesis de la investigación. Este plan obedece a las exigencias de llevar las propuestas de enseñanza ensayadas a un contexto real de aula de Ciencias, desde la perspectiva del constructivismo social (Vygotsky, 1979) y siguiendo las líneas de la Metodología *AcAb* (Domínguez y Pro, 2006).

En el capítulo siguiente se detalla cómo se operativizó el diseño experimental para contrastar las hipótesis de trabajo.

***Capítulo II*: Estrategia de investigación**

De acuerdo con la segunda fase del modelo de Tuckman (1978), en este capítulo se expone y justifica la estrategia de la investigación. Primero se describen los sujetos, características y contexto de la muestra, y en un segundo apartado se hace explícito el diseño experimental, a partir de las exigencias que se derivan de las hipótesis. Este segundo apartado, que ocupa casi todo el capítulo, se divide en varios apartados en los que se tratan los siguientes aspectos:

En primer lugar, los condicionantes del diseño experimental, que se derivan de los objetivos de la investigación y las hipótesis de trabajo, de las características del escenario de enseñanza y aprendizaje en que se llevó a cabo la investigación, y de las características del cambio metodológico que se requirió para que el docente y los alumnos se habituaran a la nueva metodología. Por esta razón consideramos que la implementación de la primera propuesta ensayada (*Termoquímica*) constituye la fase previa de la investigación, porque con ella se produjo la adaptación del profesor y los alumnos a la dinámica de trabajo que se pretendía establecer. Una vez habituados el docente y los discentes a trabajar según la nueva metodología, se aplicó la fase de intervención: el desarrollo de la propuesta *Termodinámica Química*.

Partiendo de estos condicionantes del diseño experimental, se detallan cuáles son las fases del diseño experimental.

Luego se enuncian y describen las variables implicadas en la investigación. La variable independiente, que es la metodología ensayada, se describe a lo largo de varios apartados:

Primero, se detallan los fundamentos metodológicos que inspiraron las propuestas sobre Termoquímica y Termodinámica Química. Se indican los tipos de conocimiento cuyo aprendizaje se fomenta con la metodología ensayada, y se describe el escenario de enseñanza y aprendizaje en que se trabaja, así como las estrategias de instrucción seleccionadas y las recomendaciones legislativas que guiaron el diseño y la planificación de ambas propuestas. El segundo apartado desarrolla la secuencia de las etapas en las que estructura el modelo de diseño, planificación y desarrollo (Sánchez y Valcárcel, 1993; Domínguez Castiñeiras, 2007) que se eligió como referente para elaborar las propuestas. En el último apartado sobre la variable independiente de la investigación, se exponen y discuten las actividades de las dos secuencias, *Termoquímica* y *Termodinámica Química*.

SEGUNDA PARTE: Resultados de la investigación

Siguiendo el modelo de Tuckman (1978), los resultados de las distintas fases de la investigación se discuten en relación con cada una de las hipótesis de trabajo que permiten contrastar. Dada la amplitud de los resultados, hemos considerado conveniente desglosar su estudio en los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII***.

En los ***Capítulos III*** y ***IV*** se contrastan, respectivamente, la primera y la segunda subhipótesis en las que se ha dividido la primera hipótesis, la cual está relacionada con la valoración del conocimiento que demostraron los estudiantes antes de la fase de intervención. El ***Capítulo V*** se dedica al contraste de la segunda hipótesis de trabajo. Para ello, se analiza el proceso de construcción del conocimiento que se desarrolló a lo largo de la implementación de la propuesta sobre Termodinámica Química. Los ***Capítulos VI*** y ***VII*** tienen por finalidad contrastar, respectivamente, la primera y la segunda subhipótesis en las que se divide la tercera hipótesis de la investigación, que se refiere al aprendizaje significativo logrado a raíz de la intervención. Para analizarlo, se valora el conocimiento de los estudiantes en dos momentos clave tras la implementación de la segunda propuesta: inmediatamente después de ésta (***Capítulo VI***), y dos meses más tarde (***Capítulo VII***), cuando había transcurrido tiempo suficiente como para revelar qué conocimientos presentaron suficiente estabilidad en el tiempo.

***Cap. III*: Valoración del conocimiento construido durante la fase previa**

Este capítulo se dedica a contrastar la subhipótesis de trabajo 1.1 ($sHT_{1.1}$). Para ello, se valoran los conocimientos que desarrollaron los alumnos durante la aplicación de la primera unidad didáctica (*Termoquímica*), en la que constituye la fase previa a la intervención, o de acomodación a la metodología. Los resultados del seguimiento de esta fase describen las características del conocimiento que se construyó en un proceso de aprendizaje influido por el cambio metodológico.

Para determinar estos conocimientos iniciales, se indaga en las relaciones conceptuales y procedimentales que incorporaron los estudiantes a lo largo de la

fase previa. Esta información está contenida en las manifestaciones orales y escritas con las que los alumnos dieron respuesta a las quince actividades que constituyen la secuencia *Termoquímica*. Además, analizando esta producción oral y escrita, los investigadores pueden esclarecer diversos aspectos actitudinales relacionados con la nueva metodología, en la medida en que las respuestas a las actividades ponen de manifiesto la implicación personal de cada individuo en su proceso idiosincrásico de construcción de conocimiento. El estudio de las manifestaciones individuales, en pequeño grupo y en grupo de clase permite comprobar cómo percibió la propuesta el alumnado en su conjunto, en contraposición con la singularidad e idiosincrasia de cada individuo, y qué influencias ejerció el cambio metodológico sobre el proceso de construcción del conocimiento. En relación con estos aspectos, en el ***Capítulo III*** se describen las pautas que se siguieron en la aplicación y desarrollo de la propuesta sobre Termoquímica en el aula.

Dado el pequeño tamaño de la muestra (once estudiantes), se ha podido realizar un seguimiento pormenorizado del aprendizaje que realizaron todas y cada una de las personas que la integran. Los resultados se describen e interpretan mediante dos tipos de análisis cualitativo:

- Un análisis de los esquemas de razonamiento y los esquemas de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Con finalidad ilustrativa, se ofrecen ejemplos construidos por la investigadora.
- Un análisis de las competencias que desarrollaron los estudiantes a medida que resolvían las situaciones problemáticas planteadas en las actividades de la secuencia *Termoquímica*. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y de las estrategias de acción utilizadas en la elaboración de las respuestas a las actividades, y se ilustran con manifestaciones representativas de las producciones orales y escritas correspondientes a esta fase de la investigación.

***Capítulo IV*: Valoración del conocimiento inicial de los estudiantes (caracterización inicial)**

En este capítulo se procede al contraste de la subhipótesis de trabajo 1.2 ($sHT_{1.2}$), indagando en los conocimientos que demostraron los estudiantes inmediatamente antes de la implementación de la propuesta de enseñanza *Termodinámica Química*. Los datos proceden de las respuestas escritas del alumnado a la serie de pruebas que constituyen la batería de caracterización inicial de la muestra. Nuevamente, los resultados se describen e interpretan mediante:

- Un análisis de los esquemas de razonamiento y acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se incluyen ejemplos de esquemas representativos.

- Un análisis de las competencias que demostraron los estudiantes al resolver las situaciones problemáticas de las pruebas de la caracterización inicial. Las competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas en las respuestas a las pruebas, y se ilustran con producciones extraídas de las manifestaciones del alumnado.

***C. V*: Valoración del conocimiento construido durante la fase de intervención**

Para contrastar la hipótesis de trabajo 2 (HT_2) se realiza un seguimiento del aprendizaje durante la implementación de la segunda propuesta ensayada, es decir, desde el momento en que se considera que se ha minimizado la influencia del cambio metodológico sobre el proceso de construcción del conocimiento.

El contraste de la HT_2 se basa en el análisis de las manifestaciones orales y escritas con que los estudiantes respondieron a las quince actividades implementadas de *Termodinámica Química*. Se comprueba cómo percibió el alumnado la propuesta ensayada, en contraposición con la singularidad e idiosincrasia de cada individuo. En relación con estos aspectos, en el ***Capítulo V*** se describen las pautas que guiaron la aplicación y desarrollo de la propuesta.

Nuevamente, el pequeño tamaño de la muestra ha permitido realizar un seguimiento de todos y cada uno de los participantes. Los análisis a los que se someten los resultados son los ya comentados:

- Un análisis de los esquemas de razonamiento y de los esquemas de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Con finalidad ilustrativa, se ofrecen ejemplos construidos por la investigadora.
- Un análisis de las competencias desarrolladas por los estudiantes a medida que resolvían las situaciones problemáticas planteadas en las actividades de la fase de intervención. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y de las estrategias de acción utilizadas en las respuestas a las actividades de la secuencia *Termodinámica Química*.

***C. VI*: Valoración del conocimiento final de los estudiantes (caracterización final)**

Se contrasta la subhipótesis de trabajo 3.1 ($sHT_{3.1}$). Para ello se analizan los conocimientos que se generaron por la interacción con la metodología ensayada, y que los alumnos manifestaron en las respuestas a las pruebas que constituyen la batería de caracterización final de la muestra. Esta caracterización se realizó inmediatamente después de la aplicación de la propuesta sobre Termodinámica Química, y los resultados se someten a los tipos de análisis ya presentados:

- Un análisis de los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se ejemplifican con los esquemas más relevantes.

- Un análisis de las competencias demostradas por los estudiantes en la resolución de las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas de la caracterización final. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y de las estrategias de acción utilizadas en las respuestas. Nuevamente se ofrecen ejemplos representativos.

Con la finalidad de comprobar el aprendizaje promovido por la segunda propuesta objeto de investigación, se realiza un contraste entre los resultados iniciales (correspondientes a los ***Capítulos III*** y ***IV***) y los finales (discutidos en este ***Capítulo VI***).

***C. VII*: Valoración del conocimiento de los estudiantes a medio plazo (retención)**

En este capítulo se contrasta la subhipótesis de trabajo 3.2 ($sHT_{3.2}$), determinando cuáles, de los conocimientos promovidos por la interacción de los alumnos con la metodología ensayada, permanecieron estables en un amplio plazo de tiempo. Para evaluar la estabilidad del conocimiento, se someten a análisis las respuestas que generaron los estudiantes ante las pruebas que constituyen la batería de caracterización a medio plazo (batería de retención). Esta caracterización de la muestra se realizó dos meses después de haber aplicado la propuesta sobre Termodinámica Química. Los resultados de la retención se describen y analizan mediante los tipos de análisis ya indicados:

- Un análisis de los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se ilustran varios esquemas relevantes.
- Un análisis de las competencias demostradas por los estudiantes en la resolución de las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas de retención. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y de las estrategias de acción utilizadas en las respuestas a las pruebas, comentadas con ejemplos representativos.

Para estudiar la influencia de la metodología ensayada en la evolución de las formas de pensar y de hacer de los estudiantes, se realizan contrastes entre los resultados de los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VI***, por un lado, y los discutidos en el ***Capítulo VII***, por otro:

Primero se contrastan los resultados de la batería de retención (***Capítulo VII***) con los correspondientes a los conocimientos iniciales (***Capítulos III*** y ***IV***), para determinar el aprendizaje estable que promovió la propuesta sobre Termodinámica Química. Después, los resultados de la retención (***Capítulo VII***) se someten a contraste con los de la caracterización final (***Capítulo VI***). Así se comprueba qué conocimientos permanecieron estables durante un periodo de tiempo lo bastante prolongado para considerar que son resultado de un aprendizaje significativo.

TERCERA PARTE: Conclusiones e implicaciones de la investigación. Bibliografía consultada

Capítulo VIII: Conclusiones e implicaciones de la investigación

El último capítulo de la Memoria de Tesis se abre con un estudio global y una recapitulación de los resultados de la investigación, cuyo objetivo es ofrecer al lector un resumen analítico de los resultados obtenidos en los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII***. Para completar la visión global del proceso investigativo, junto a la interpretación de los resultados de cada fase se sintetizan las correspondientes conclusiones que de ellos se extraen, y que ya se habían enunciado formalmente en los ***Capítulos III-VII***. Del resumen se derivan las conclusiones de la investigación, respecto del aprendizaje realizado y la efectividad de las propuestas ensayadas.

El tercer apartado de este capítulo se dedica a exponer las implicaciones de la investigación, incluyendo implicaciones para la enseñanza de la Termodinámica Química, algunas sugerencias para la revisión y optimización de las propuestas didácticas *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, y una serie de recomendaciones para futuras implementaciones de las propuestas didácticas *Termoquímica* y *Termodinámica Química* en contextos reales de aula.

El ***Capítulo VIII*** finaliza con la formulación de nuevos problemas de investigación que podrían ser la base de futuros trabajos.

Bibliografía consultada

La presente Memoria de Tesis se cierra con un apartado sobre la bibliografía que los investigadores consultaron en la realización del trabajo. Este apartado se halla separado de la relación capitular, puesto que no está encuadrado en ninguna fase concreta de la investigación.

El apartado sobre la bibliografía consultada consiste en la relación de todas las referencias citadas en la Memoria, listadas por orden alfabético del primer apellido de los autores (Índice de la bibliografía consultada).

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

PRIMERA PARTE: Planteamiento y fundamentación de la investigación

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

I. Marco teórico de la investigación

En este capítulo, se contextualiza y justifica en varios apartados la problemática de la presente investigación de Tesis Doctoral:

Origen de la investigación (pág. 3). En el primer apartado se describe el origen de la investigación, haciendo explícitas las influencias que sobre la misma han tenido nuestra formación y nuestras motivaciones, la interacción con el profesorado y con una de las líneas de investigación del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la USC, las nuevas ideas que emanan de la investigación en enseñanza de las Ciencias, y las reformas del sistema educativo.

Planteamiento de los problemas de investigación (pág. 11). Se plantean los problemas de investigación que se abordan, derivados de nuestro convencimiento de que, para que se produzca un aprendizaje significativo de conceptos, modelos, procedimientos y actitudes, los alumnos deben desarrollar estrategias de razonamiento y destrezas y técnicas de investigación que destaquen el carácter funcional del conocimiento científico.

Revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales (pág 14). Esta revisión permite, en primera instancia, profundizar en los problemas de la investigación, y, en segunda instancia, emitir las hipótesis de trabajo que de ellos se derivan. Las temáticas que se incluyen en este apartado configuran el marco teórico en el que se encuadra el presente trabajo:

Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar (pág. 15)

El proceso de aprendizaje en las Ciencias Experimentales (pág. 27)

Implicaciones para la enseñanza de las Ciencias (pág. 61)

La situación actual de la enseñanza de las Ciencias (pág. 92)

Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias (pág. 118)

Hipótesis de la investigación (pág. 253). Partiendo del marco teórico expuesto en el apartado anterior, se fundamentan, enuncian y operativizan las hipótesis de trabajo.

Plan de trabajo (pág. 258). En este último apartado del *Capítulo I* se establece el plan de trabajo que se elaboró para contrastar las hipótesis de la investigación, y que obedece a las exigencias de llevar las nuevas propuestas de enseñanza a un contexto real de aula de Ciencias. El diseño experimental propiamente dicho se desarrolla en el ***Capítulo II***, y las distintas fases de este plan de trabajo se van describiendo a lo largo de los ***Capítulos III-VII***.

I.1. Origen de la investigación

Antes de plantear la naturaleza y las características de la investigación que aquí se presenta, consideramos oportuno retrotraernos al origen de la misma para mostrar al lector qué factores influenciaron su concepción y desarrollo. Los apartados en los que se desarrolla este apartado comienzan detallando las *Motivaciones personales* (pág. 3) de la investigadora que la guiaron hasta el proyecto *AcAb*. Después se describen el historial de dicho proyecto, el sentido de su continuación en la actualidad y el lugar que esta Tesis ocupa en la labor investigadora del Departamento (*Antecedentes de la investigación: el proyecto AcAb y su continuación en la actualidad*, pág. 4). A continuación pasan a enumerarse las razones que nos han llevado a centrar nuestra atención en la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica Química en 2º de Bachillerato (*Concreción de la investigación: razones para investigar sobre la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos* (pág. 7). Por último, se explica cómo se seleccionó el escenario en el que se llevaría a cabo la parte experimental de esta investigación de Tesis (*Escenario de la investigación*, pág. 10).

I.1.1. Motivaciones personales

El comienzo de esta investigación tuvo lugar en mayo de 2007, a raíz de la conversación que yo, la autora de la presente Memoria, mantuve con el Dr. José Manuel Domínguez Castiñeiras en su despacho del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales en la Facultad de Ciencias de la Educación de la USC.

Durante aquel curso 2006-2007, yo estudiaba el segundo año de Doctorado en un grupo de investigación sobre compuestos macrocíclicos, en el Departamento de Química Inorgánica de la Facultad de Química de la USC. Había contactado con este grupo de investigación en mi último año de carrera (2004-2005), cuando buscaba un profesor que dirigiera mi proyecto de Licenciatura. Por aquel entonces, entré en el proyecto de investigación que desarrollaban allí, sobre síntesis y caracterización de complejos macrocíclicos de los metales transicionales, post-transicionales y lantánidos. En este proyecto me ocupé durante dos años hasta que, en mayo de 2007, decidí no continuar. En aquel momento me encontraba a pocas semanas de presentar el Trabajo de Investigación Tutelado; contaba con la beca de la Xunta de Galicia para la realización de los estudios de 3º ciclo, y tenía bastantes posibilidades de entrar en el *Programa Mª Barbeito* de la Xunta de Galicia para realizar la Tesis Doctoral.

Los motivos personales que me llevaron a abandonar la investigación de laboratorio son el origen del trabajo que aquí se presenta; pero no me extenderé en ellos, porque obligaría al lector a leer una larga historia que daría por tierra con el propósito práctico de este apartado. Me limitaré a comentar que la principal causa de que esta Tesis haya sido posible se remonta al curso 1993-1994 y, aunque no está

en absoluto relacionada con la Didáctica de las Ciencias, fue la que me llevaría a madurar, en algún momento entre 2002 y 2003, la idea de dedicarme profesionalmente a la enseñanza de las Ciencias.

Como resultado inmediato de esta inspiración, realicé el Curso de Aptitud Pedagógica justo después de licenciarme y, a principios de 2007, pasé por una intensa etapa de reflexión que cambió de rumbo mis estudios de Doctorado:

Por un lado, consideraba que el trabajo realizado en los últimos meses había reforzado mi interés por el trabajo docente. La formulación del CAP me contrarió, pero también me hizo consciente de que la actividad investigadora en el ámbito de las Ciencias no se reduce a la síntesis y caracterización de compuestos químicos o a la física de partículas. Para decirlo en pocas palabras: en 2007 descubrí que existe la Didáctica de las Ciencias, y esto me llevó a pensar que ampliar mis estudios sobre ella mejoraría mi formación para el futuro ejercicio de la carrera docente. Además, sospechaba que estudiar las oposiciones no me aportaría otra cosa que largas horas de exposiciones sobre contenidos conceptuales de Física y Química… sospecha que, pocos meses más tarde, habría de confirmar empíricamente.

Estas son las razones de que me planteara compaginar la actividad investigadora con la formación académica en Didáctica de las Ciencias, y, en consecuencia, decidiera realizar mi Tesis en Didáctica de las Ciencias.

En un primer momento me dirigí al Instituto de Ciencias de la Educación de la USC. Allí, el profesor J. Mendoza me informó sobre la actividad del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Facultad de Ciencias de la Educación. También me puso en contacto con el Dr. Domínguez Castiñeiras, con el que luego me entrevisté. En este encuentro, el Dr. Domínguez Castiñeiras me propuso realizar una Tesis que se encuadraría en una de las líneas de investigación que se llevaban desarrollando en el Departamento desde hacía varios años, y que en aquel momento ya había dado lugar a la publicación de varias Tesis Doctorales (Domínguez Castiñeiras, 2000; Sánchez Piso, 2006), y que seguiría dando sus frutos durante la elaboración de mi Tesis (Rocha, 2008; Prado Orbán, 2010).

I.1.2. Antecedentes de la investigación: el proyecto *AcAb* y su continuación en la actualidad

La línea de investigación *AcAb* nació a principios de la década de los ochenta por iniciativa del profesorado de la Cátedra de Física y Química y de Ciencias Naturales de la Escuela Universitaria de Santiago de Compostela, hoy Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Los integrantes de este grupo compartían la idea de que una enseñanza de calidad exige investigación e innovación por parte de los docentes, cualquiera que sea el nivel educativo en que trabajen. Partiendo de esta convicción, concretaron sus inquietudes en la creación del proyecto de innovación curricular y metodológica *Actividades Abiertas* (*AcAb*).

En una época en la que la entonces Escuela Universitaria se hallaba bastante aislada del profesorado y de la inspección educativa, el apoyo de la Dirección de la Escuela, el I.C.E. de la USC y la Inspección Técnica de E.G.B. fueron decisivos para ayudarles a consolidar el Seminario Permanente Bases de Perfeccionamiento de Profesorado de E.G.B.: Área de Ciencia de la Naturaleza, integrado por los profesores del *Proyecto AcAb*, de enseñanza universitaria y de E.G.B. (García-Rodeja E. , Domínguez, Lorenzo y Díaz, 1988a).

El funcionamiento del Seminario proporcionó a los investigadores la necesaria retroalimentación entre el naciente *Proyecto AcAb* y la realidad de los docentes, y esta actividad dejó campo abierto a una línea de investigación muy activa que dio como resultados más destacados el diseño y desarrollo de la metodología *Actividades Abiertas* (García-Rodeja, Domínguez y Lorenzo, 1989a); la elaboración de materiales de enseñanza y aprendizaje que se concretaron en las monografías *Proyecto AcAb, Química* (García-Rodeja Fernández, Lorenzo Barral, Domínguez Castiñeiras y Díaz de Bustamante, 1987; García-Rodeja, Díaz, Domínguez y Lorenzo, 1988b), y el *Proyecto AcAb, Física* (García-Rodeja Fernández, Lorenzo Barral, y Domínguez Castiñeiras, 1994); publicaciones en revistas especializadas y comunicaciones a congresos, entre los que destaca el taller desarrollado en el III Congreso Internacional sobre la Didáctica de las Ciencias y de las Matemáticas (García-Rodeja, Lorenzo y Domínguez, 1989b) y el trabajo de investigación conjunta (Domínguez *et al.*, 1994) presentado en la Conferencia Internacional Las Didácticas Específicas en la Formación del Profesorado.

La actividad del Seminario Permanente terminó en 1994, año de publicación de la monografía *Proyecto AcAb Física*. Las nuevas actividades del Departamento continuaron partiendo del convencimiento de que la investigación en Didáctica de las Ciencias debe estar íntimamente ligada a la docencia (Domínguez *et al.*, 1994), idea que comparten numerosos investigadores de toda España (Pro, 1990; Mellado, 1996; Mellado, 1998). En la década de los noventa, desde la comunidad investigadora en Didáctica de las Ciencias se enfatizaba en la necesidad de concienciar sobre la importancia de la función docente en la construcción de un sistema educativo de calidad. Pero este consenso no parecía tener eco ni en la formación inicial y permanente del profesorado, ni en los nuevos planes de estudio y metodologías que se implantaban en las aulas, a pesar de que los investigadores mantenían vivo un interesante debate sobre la reformulación de estos aspectos (del Carmen, 1997; Perales Palacios y Cañal de León, 2000; Sanmartí, 2002; *passim*).

Ha transcurrido una década desde el comienzo del siglo XXI, y el distanciamiento entre la investigación en Didáctica de las Ciencias y la práctica de la enseñanza continúa sin superarse, aun cuando hay muchos motivos para afirmar que la Didáctica de las Ciencias Experimentales se adentró hace años en una etapa de consolidación como disciplina emergente (Perales Palacios y Cañal de León, 2000; Adúriz y Izquierdo, 2002; Sanmartí, 2002; Oliva, 2005). La desconexión de la

investigación y la práctica docente sigue de manifiesto en los modelos de formación del profesorado (Mellado, 2000; Mellado y González, 2000), todavía muy influenciados por los viejos modelos instruccionales que los docentes observaron y padecieron en su formación. También en la práctica investigadora del profesorado se perciben imágenes de la Ciencia y del conocimiento científico que distan bastante de la actual epistemología de la Ciencia (Porlán, Rivero y Martín, 2000).

En la primera década del siglo XXI, la formación del profesorado sigue sin aportar respuestas adecuadas a las necesidades profesionales de los docentes. Como consecuencia, éstos todavía organizan y desarrollan sus modelos de instrucción a fuerza de trabajo y experiencia individual, lo que en muchos casos deriva en métodos de ensayo y error y a la larga puede traducirse en desencanto personal. Desde muchos grupos de investigación se afirma que uno de los mayores retos a los que se enfrenta la comunidad educativa es precisamente el de romper la disociación entre la investigación y la práctica docente (Solbes, Furió, Gavria y Vilches, 2004). Con este objetivo, en la última década se han venido planteando varias iniciativas que proponen, por ejemplo, crear comunidades de profesores e investigadores que compartan objetivos y planteamientos (Ens. CCs. Nº 34, Barcelona, 2002). En este contexto, las inquietudes con que se inició el proyecto *Actividades Abiertas* siguen vigentes dos décadas después (Domínguez Castiñeiras y Pro Bueno, 2006).

Cuando comenzó esta Tesis, tanto la investigación en Didáctica de las Ciencias como las reformas educativas en España y Europa (MEC, 2006; OCDE, 2005) propugnaban un nuevo modelo de profesor más dinámico y activo (*El nuevo modelo de profesorado*, pág. 63): dinámico, porque ejerce de mediador en la construcción de conocimiento (Osborne y Wittrock, 1983; Bertelle *et al.*, 2006), con su capacidad de crear entornos y formas de trabajo para que los alumnos se erijan en protagonistas del aprendizaje; y activo, porque planifica y evalúa su propia actividad. El nuevo profesor representa una figura profesional capaz de responder a las necesidades y perspectivas de una sociedad muy compleja, inmersa en un contexto cultural e histórico en vertiginosa evolución (VV.AA., 2009a). Este modelo exige que el profesor mantenga un contacto permanente con la investigación educativa, que le ayude a profundizar en el conocimiento de nuevas publicaciones y en el desarrollo de una actividad investigadora que le permita mejorar sus estrategias de dirección de aula (Shón, 1993).

De acuerdo con la investigación educativa, cuando el profesor elabora un plan de acción docente, se enfrenta a una serie de interrogantes sobre cómo se desarrollan las destrezas y estrategias de pensamiento y comunicación con las que se favorecen la obtención y el procesamiento de información, que convierten ésta en conocimiento. Además, debe plantearse interrogantes relacionados con las finalidades de la ciencia escolar (*Figura 4*, pág. 26): ¿qué conocimientos se pretenden construir?, ¿qué destrezas experimentales interesa desarrollar?, ¿qué destrezas cognitivas es conveniente promover?, ¿qué actitudes y valores se desea fomentar?

Para ayudar al profesor a resolver todos estos interrogantes, consideramos necesario brindarle nuevas propuestas de enseñanza que tengan por objetivo favorecer un aprendizaje significativo de la ciencia escolar (Domínguez Castiñeiras, García-Rodeja, Pro e Illobre, 2001; Domínguez Castiñeiras, 2007). Éste es el propósito de la línea de investigación en la que se encuadra esta Tesis Doctoral: elaborar y difundir instrumentos que puedan servir a los docentes en su papel de guías del aprendizaje. De hecho, la variable independiente de esta Tesis viene representada por la segunda de las dos propuestas didácticas que se evalúan, ambas inspiradas en la metodología *AcAb* y en las perspectivas del constructivismo social derivadas de la investigación en Didáctica de las Ciencias (*Variable independiente: la metodología de enseñanza*, pág. 289). Idéntico compromiso y fundamentación han guiado las demás Tesis vinculadas al Departamento en la última década: (Domínguez Castiñeiras, 2000; Sánchez Piso, 2006; Rocha, 2008; Prado Orbán, 2010).

Hasta este punto se han expuesto las influencias que han tenido sobre la concepción y desarrollo de esta Tesis nuestra formación, nuestras motivaciones y nuestras perspectivas sobre la función docente e investigadora. A continuación se precisan las razones concretas que nos han llevado a investigar sobre la enseñanza y el aprendizaje de la termodinámica de los procesos químicos.

I.1.3. Concreción de la investigación: razones para investigar sobre la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos

Antes de plantear los problemas de investigación, se avanzan algunas de las ideas claves que se extraen del estado de la cuestión (*Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias*, pág. 118). Teniendo en cuenta los resultados de este estudio y nuestras convicciones, expuestas en los apartados anteriores, concluimos que hay suficientes razones para dedicar esta investigación a la Termodinámica Química:

En primer lugar, el tema de Termodinámica está contemplado en los *curricula* de Bachillerato de todos los países. Además, todos recogen desde los primeros niveles de enseñanza algunos prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica, como el calor y la temperatura (Domínguez Castiñeiras, 2000) o la energía (Doménech, 2000). En este sentido, las administraciones educativas conceden a esta disciplina una importancia no desdeñable.

Esta relevancia que se otorga a la Termodinámica en el *curriculum* (MEC 2006b, 2007; XUGA, 2007, 2008) está justificada desde el punto de vista epistemológico por su trascendencia en el estudio de la Dinámica de los procesos químicos. Si partimos de la base de que mediante la enseñanza de las Ciencias se pretende que los estudiantes logren un aprendizaje significativo de conceptos, modelos y procedimientos científicos que les resulten útiles para interpretar

situaciones, hechos y fenómenos, entre estos conocimientos deseables deben figurar aquéllos mediante los que la Ciencia describe, justifica y predice los aspectos energéticos de los procesos naturales (Solbes y Tarín, 2004) y los mecanismos que hacen posible los cambios en los sistemas materiales (Gillespie, 1997; Sözbilir, 2004b). Los constructos de la Termodinámica, junto con los modelos de enlace y estructura de la materia, explican el hecho de que cualquier proceso se verifica solamente en unas condiciones determinadas, aunque es posible que la velocidad del proceso impida al observador percibir la transformación. Desde el punto de vista científico, la Dinámica de los procesos químicos comprende tres áreas de conocimiento: la Termodinámica Química (qué cambios pueden suceder en un sistema), la Cinética Química (a qué velocidad se producen los cambios) y el Equilibrio Químico (en qué estado queda el sistema una vez se han dejado de percibir cambios). Una comprensión adecuada de los conceptos y procedimientos de estas áreas permite interpretar eficazmente las transformaciones que ocurren en los sistemas materiales y, además, ayuda a construir una imagen global de la Ciencia como un cuerpo de conocimientos útil, elaborado por y para la humanidad.

Otra razón que nos ha impulsado a elegir este tema de investigación es la escasa cantidad de propuestas didácticas completas que se han publicado sobre Termoquímica y Termodinámica Química. Revisando la literatura científica advertimos que la atención que han recibido la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica Química por parte de la investigación en Didáctica de las Ciencias no es, hasta la fecha, tan detallada como cabría esperar para uno de los temas centrales de la Dinámica de los procesos químicos (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008a). Existe un buen número de autores que analizan la enseñanza y aprendizaje de los aspectos energéticos de los procesos naturales; sin embargo, la mayor parte de ellos se centran en clarificar aspectos oscuros de la epistemología o en argumentar a favor o en contra de la introducción de la Termodinámica en el *curriculum* de la enseñanza secundaria…, sin olvidar que estas discusiones apenas salen del ámbito disciplinar de la Física, mientras que la Química y la Biología permanecen en segundo y tercer plano, respectivamente (*Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias*, pág. 118). En este estado de cosas, la literatura está lejos de ofrecer al profesorado suficientes instrumentos para ejercer de guía en la construcción de los conocimientos sobre Termoquímica y Termodinámica Química. En 2008, cuando se analizó el estado de la cuestión para esta investigación (*Fases del plan de trabajo y cronología de la investigación*, pág. 260), un gran número de las publicaciones se dedicaba a vincular o desvincular el concepto de energía de los polémicos constructos de calor y trabajo. También se observaba un creciente esfuerzo en identificar e interpretar las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje. Pero al mismo tiempo, el diseño de propuestas de enseñanza apenas recibía atención, y solamente un pequeño porcentaje de los estudios incluían alguna actividad que los docentes pudiesen

incorporar a sus clases (*Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias*, pág. 118). Al actualizar la bibliografía del estado de la cuestión, en 2014, se observa que el panorama ha cambiado poco en los últimos años (*Características del conocimiento previo de los estudiantes*, pág. 415).

Probablemente la escasez de investigaciones en este ámbito tiene mucho que ver con la dificultad que entraña la comprensión de un tema tan abstracto y conceptualmente demandante como la Termodinámica (*Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica*, pág. 123). En este sentido, destaca la polémica que se viene desarrollando desde hace tres décadas en el seno de la comunidad investigadora en Didáctica de las Ciencias Experimentales:

La comunidad científica reconoce que la Termodinámica es una de las áreas más complejas y difíciles de la Ciencia. ¿Se puede esperar, entonces, que los alumnos de enseñanza secundaria lleguen a entender y utilizar en su vida diaria estos constructos teóricos? ¿Se debería postergar su estudio hasta los últimos años de Bachillerato? ¿Se debería eliminar del *curriculum* de la enseñanza secundaria? Aunque será en un apartado posterior cuando examinemos los orígenes y los argumentos más destacados de esta polémica (*Propuestas y materiales de enseñanza en Termoquímica y Termodinámica Química*, pág. 198), en este punto queremos dejar constancia de nuestro compromiso al respecto:

De acuerdo con la idea de que la enseñanza de las Ciencias debe servir para lograr una alfabetización científica con la que todos los integrantes de la sociedad puedan analizar en profundidad los problemas sociocientíficos (Vilches, Solbes y Gil, 2004) y tomar decisiones sobre cuestiones de base científica que, en muchos casos, les afectan directamente en sus vidas (Solomon, 1991; Norris y Phillips, 1994), consideramos que no se debe omitir el estudio de la Termodinámica en la enseñanza secundaria. En primer lugar, porque esta disciplina constituye uno de los ejes del conocimiento científico y juega un papel central en el marco de las nuevas teorías que pretenden unificar el estudio dinámico de los procesos e interpretar el pasado y el futuro del universo. En segundo lugar, porque es uno de los históricos campos de batalla en la lenta y difícil consolidación de la Ciencia como herramienta social para el desarrollo de la humanidad. La evolución de la Termodinámica a lo largo de los siglos XVIII, XIX y XX propició buena parte de los avances en la industria, las comunicaciones y el transporte, y no es disparatado afirmar que ha jugado un papel protagonista en la construcción de nuestra sociedad actual. Además, en el escenario histórico, social y económico en el que ahora nos encontramos, la resolución de muchos de los problemas a los que se enfrentan las sociedades humanas pasa necesariamente por la aplicación de los conocimientos termodinámicos. De los muchos ejemplos donde la contribución de la Termodinámica al progreso de la humanidad tiene ahora una relevancia mundial, podemos citar el estudio del cambio climático y la búsqueda de soluciones a las dificultades que éste plantea, la búsqueda de fuentes energéticas cuya gestión sea medioambientalmente sostenible

y socialmente legítima, la planificación de hábitos saludables en la nutrición, la optimización de la maquinaria industrial y los medios de transporte… De ahí que desde distintos ámbitos se contemple la Termodinámica básica como conocimiento científico relevante para la vida personal y social (Campbell, 1979; Drago, 1994; Pérez *et al.*, 1995; Varela *et al.*, 1997; Millar y Osborne, 1998; Driver, Newton y Osborne, 2000; OECD, 2000; Trumper, Raviolo y Shnersch, 2000; Solbes y Tarín, 2004; Pérez-Landazábal y Varela-Nieto, 2006; Hecht, 2007; Sakschewski *et al.*, 2014).

Según (Pozo, 1992), las ideas cotidianas nos permiten interpretar una gran variedad de acontecimientos, y así tener un cierto control sobre ellos. Pero si pretendemos que, al finalizar la enseñanza obligatoria, los estudiantes estén capacitados para ejercer la ciudadanía activa con autonomía e iniciativa en ámbitos como la salud, la economía productiva, los avances científicos y tecnológicos, etc., necesariamente debemos potenciar aquellos aprendizajes relacionados con los conocimientos científicos de diferentes disciplinas (MEC, 2006b). Entre estos aprendizajes útiles para la toma de decisiones sociocientíficas, la Termodinámica ocupa un lugar destacado en el ámbito de la Dinámica de los procesos naturales.

Para terminar de enumerar las razones que nos han llevado a centrar esta investigación en la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos, indicaremos que también nos ha guiado la línea de investigación a la que se adscribe esta Tesis: con el tema de Termodinámica se completa la serie de estudios dedicados a la Dinámica de los procesos químicos, en la que destacamos las investigaciones sobre calor y temperatura (Domínguez Castiñeiras, 2000), Cinética Química (Sánchez Piso, 2006) y Equilibrio Químico (Rocha, 2008).

I.1.4. Escenario de la investigación

La dirección del presente trabajo ha sido realizada por el Dr. José Manuel Domínguez Castiñeiras, profesor del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la USC. La Tesis, bajo el título de "E***nseñanza de la Termodinámica Química en el Bachillerato. Diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica***" se ha desarrollado en el marco del Programa de Doctorado en Didáctica de las Ciencias Experimentales, aprobado en 1990.

La parte experimental de esta investigación tuvo lugar durante el curso 2008-2009 en el I.E.S. público *Fernando Esquío* de Neda (provincia de Coruña). La intervención docente corrió a cargo del profesor de educación secundaria Rodrigo Montes Rodríguez, que una década antes, en el mismo I.E.S., había dado clase de Química de 2º de Bachillerato a la autora de esta Memoria. Dicho esto, no hace falta indicar que en la elección de este profesor y de este centro jugó algo más que la intención de analizar un contexto natural de enseñanza y aprendizaje: antes de comenzar el trabajo experimental de la Tesis, la investigadora ya conocía personalmente tanto al docente como las características del Instituto. Por ello, sabía

que Rodrigo tenía un perfil adecuado para esta investigación, especialmente en su motivación por seguir mejorando sus estrategias de dirección de aula. Como profesor, ha participado en varias actividades de investigación e innovación educativa y amplía continuamente su formación docente. Las características del centro y de la muestra eran asimismo adecuadas para la Tesis, porque configuraban un contexto natural de enseñanza y aprendizaje al tiempo que permitían a los investigadores seguir de cerca la evolución de los conocimientos de todos y cada uno de los estudiantes (*Sujetos, características y contexto de la muestra*, pág. 265) e indagar en los obstáculos de aprendizaje que se presentaran. Estas características del Centro y de la muestra permitieron también a los investigadores validar el análisis del aprendizaje por competencias en un grupo de alumnos pequeño y fácil de monitorizar (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, pág. 458).

Hemos de agradecer al profesor Rodrigo Montes Rodríguez la oportunidad de poner en práctica nuestras unidades didácticas *Termoquímica* y *Termodinámica Química* en el I.E.S. *Fernando Esquío* de Neda. Su colaboración desinteresada y la de sus once alumnos de Química de 2º de Bachillerato (a los que también damos las gracias por dejarnos entrar en el aula) contribuyeron decisivamente a materializar el trabajo de Tesis Doctoral que se expone en la presente Memoria.

Dejada constancia del origen de la investigación que se describe, se procede a plantear la problemática asociada a ella, teniendo en cuenta nuestra perspectiva sobre las finalidades de la enseñanza de las Ciencias y las exigencias de la epistemología científica para definir los problemas de investigación (Bunge, 1981).

I.2. Planteamiento de los problemas de investigación

Estudiar los efectos de una metodología didáctica sobre las formas de pensar y de hacer de un grupo de estudiantes implica averiguar qué logros de aprendizaje alcanzaron. Así pues, para concretar los problemas de la investigación se requiere determinar cómo se espera que evolucionen los conocimientos del alumnado, de acuerdo con las finalidades de la enseñanza de las Ciencias.

Desde nuestro punto de vista, las finalidades de la enseñanza de las Ciencias se resumen como sigue (*Figura 4*, pág. 26):

En primer lugar, la enseñanza de las Ciencias tiene por objetivo que los alumnos logren un aprendizaje significativo de los conceptos, modelos y procedimientos que les resulten útiles para interpretar una gran variedad de situaciones, hechos y fenómenos. En segundo lugar, la enseñanza debe orientarse a que los estudiantes adquieran actitudes y valores con los que construyan una imagen actualizada de la Ciencia y de la actividad científica.

A este respecto, estamos convencidos de que desde la enseñanza de las Ciencias se debe fomentar el desarrollo del razonamiento y la argumentación como

destrezas cognitivas encaminadas a lograr un aprendizaje significativo tanto de conceptos, modelos y procedimientos, como de actitudes y valores deseables (*Componentes del aprendizaje*, pág. 35). Sobre esta base, y tomando como referencia la definición de Bunge (1981) para los problemas de investigación, se formulan a continuación los correspondientes a la presente Tesis Doctoral:

I.2.1. Planteamiento del primer problema de investigación

El primer problema consiste en determinar el conocimiento inicial de los estudiantes. Para ello se deben valorar los conocimientos que éstos tenían en el momento en que comenzó la intervención propiamente dicha, es decir, cuando se puede considerar que se han minimizado en lo posible las influencias del cambio metodológico sobre el proceso de aprendizaje: inmediatamente antes de aplicar la segunda propuesta de enseñanza.

De estas reflexiones se deriva el primer problema de investigación:

Antes de aplicar la segunda propuesta objeto de investigación,

¿en qué medida son adecuados y están suficientemente estructurados, desde el punto de vista de la ciencia escolar, los conocimientos de los estudiantes sobre ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***) y las destrezas en ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)?

¿qué competencias demuestran los estudiantes al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales?

I.2.2. Planteamiento del segundo problema de investigación

Desde nuestro punto de vista, una investigación didáctica no debe tratar el proceso de aprendizaje como una "caja negra" sobre la que uno se limita a analizar las condiciones iniciales y finales. Para profundizar en el proceso de aprendizaje se debe realizar un seguimiento de la intervención en el aula, lo que permite explorar la evolución del conocimiento a la luz de la información contenida en las respuestas de los estudiantes a las diferentes situaciones de aprendizaje. En investigaciones como ésta, de gran extensión en el tiempo, la información extraída *in situ* es fundamental para obtener datos de gran relevancia que serían difíciles de extraer de otra manera.

En consecuencia, se formula el segundo problema de la investigación:

La aplicación de la segunda propuesta didáctica en el aula,

¿hasta qué punto favorece o promueve la activación de los esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y la activación de esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)?— acordes con la ciencia escolar, que permitan a los estudiantes construir, estructurar y transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales?

¿hasta qué punto favorece o promueve un avance en las competencias de los estudiantes, de manera que éstos demuestren una mejor transferencia de sus conocimientos para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales?

I.2.3. Planteamiento del tercer problema de investigación

Terminada la intervención con la metodología ensayada, deben determinarse los cambios que se propiciaron en los conocimientos de los estudiantes.

La calidad del aprendizaje generado se verifica indagando qué conocimiento demuestran los alumnos a corto plazo y un cierto tiempo después de la intervención. Aquellos conocimientos que se observan estables en un espacio de tiempo considerable se pueden suponer fruto de un aprendizaje significativo.

La determinación de los conocimientos finales del alumnado se realizó a partir de dos caracterizaciones de la muestra: la primera se realizó inmediatamente después de la aplicación de la segunda propuesta (caracterización final); la segunda se aplicó dos meses después de la intervención (retención), antes de que el curso académico terminara y, con él, la oportunidad de aplicar las pruebas de retención a los individuos de la muestra. Para cada una de las dos caracterizaciones finales se diseñó una batería distinta de pruebas con la suficiente entidad para poder establecer conclusiones lo menos subjetivas posible sobre el funcionamiento de la metodología ensayada y el aprendizaje generado. El diseño de los métodos de análisis del aprendizaje utilizados permite identificar cuáles son los conocimientos de cada individuo en un momento dado, con razonable independencia de las pruebas. En el apartado *Instrumentos y estrategias de análisis y evaluación del aprendizaje* (pág. 455) se recoge el proceso que se siguió en el procesamiento de los resultados de esta investigación.

A este respecto, se plantea el tercer problema de investigación:

Después de aplicar la segunda propuesta objeto de investigación,

¿en qué medida activan los estudiantes, después de la instrucción, esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y la activación de esquemas de acción —y las destrezas en ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)?— acordes con la ciencia escolar, y útiles para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales?

¿qué competencias demuestran los estudiantes al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales?

¿cuál es la significatividad de los progresos que se observan en los conocimientos y competencias de los estudiantes, respecto de su situación inicial?

¿hasta qué punto se constata una permanencia significativa en los aprendizajes transcurrido un cierto tiempo desde la intervención? ¿Qué aprendizajes demuestran una mayor estabilidad en el tiempo?

I.3. Revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales

Con la finalidad de concretar el marco teórico en el que se desarrolla la Tesis, se realiza una revisión de la literatura científica en Didáctica de las Ciencias Experimentales, centrándonos en aquellos aspectos de la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias que pueden tener más implicaciones en este trabajo investigador:

En primer lugar, se discuten las *Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar* (pág. 15), partiendo de las consideraciones filosóficas más relevantes sobre la naturaleza y la epistemología de la Ciencia. A continuación, se analizan las principales aportaciones que ha realizado la investigación en Didáctica de las Ciencias Experimentales sobre los procesos de aprendizaje (*El proceso de aprendizaje en las Ciencias Experimentales*, pág. 27) y las principales *Implicaciones para la enseñanza de las Ciencias* (pág. 61). En relación con estos aspectos, se contextualiza la problemática sobre la coyuntura actual de la enseñanza en España, teniendo en cuenta la reforma educativa que estaba vigente en el momento de la intervención en el aula, así como las recientes propuestas de la Unión Europea y de la OCDE, así

como las tendencias actuales en *La situación actual de la enseñanza de las Ciencias* (pág. 92). Por último, se revisa el *Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias* (pág. 118), las tres últimas décadas de la investigación sobre la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos, con el objeto de analizar aquellas contribuciones que pueden tener implicaciones para nuestra investigación.

I.3.1. Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar

En este apartado se analizan las implicaciones que tiene la naturaleza de la Ciencia sobre la elaboración de las propuestas didácticas ensayadas (Pro, Hernández y Saura, 1997). Primero se establece cuál es nuestra concepción de la Ciencia como campo de conocimiento (*Revisión de las principales perspectivas sobre la naturaleza y epistemología de la Ciencia*, pág. 15) y luego se analiza qué consecuencias tiene esta concepción sobre el enfoque que proponemos para acercar a los estudiantes los procesos de construcción del conocimiento científico (*Ciencia formal y ciencia escolar: la transposición didáctica*, pág. 25).

I.3.1.1. Revisión de las principales perspectivas sobre la naturaleza y epistemología de la Ciencia

A lo largo de la historia, la Ciencia ha alcanzado un nivel extraordinario en la elaboración de constructos teóricos y procedimentales para interpretar el mundo. Gracias a la actividad científica, hoy la humanidad dispone de conocimientos de gran amplitud y profundidad, que han aportado (y continúan aportando) soluciones muy valiosas a numerosos problemas sociales. Sin embargo, no se observa tanto éxito en el establecimiento de un consenso sobre la relación entre el mundo estudiado y el conocimiento científico que se utiliza para interpretarlo; y tampoco se ha llegado a un acuerdo sobre la naturaleza de la metodología con la que se produce este conocimiento. A comienzos del siglo XXI, el debate continúa abierto y sigue concentrando la atención de los investigadores en Filosofía de la Ciencia (Driver, Newton y Osborne, 2000).

El mundo natural y el conocimiento científico

Desde la actual Filosofía de la Ciencia se sostiene que la evolución del conocimiento científico depende de la estructura de éste (Giere R. N., 1994), y en especial del desarrollo de las teorías científicas (Hodson, 1992; Hodson, 1998). Las nuevas perspectivas epistemológicas, desde los paradigmas de (Kuhn T. S., 1975) a los programas de investigación de (Lakatos, 1978), niegan que la observación y la experimentación sean más relevantes que la teorización, y conceden a las teorías un papel preponderante entre los factores que condicionan el desarrollo de la Ciencia. En resumen, las afirmaciones del conocimiento no pueden basarse únicamente en la observación, puesto que ésta está necesariamente condicionada por la teoría

aceptada. Duschl (1997) recoge la esencia de esta idea cuando afirma que las teorías científicas son las piedras angulares de la Ciencia, porque representan las formas contrastadas de razonar sobre el mundo y son una síntesis de los hechos, objetivos y métodos de la Ciencia. Sobre esta base podemos considerar que, al margen de la relación que existe entre el mundo y el conocimiento que construimos, el mundo existe, y lo estudiamos a través del conocimiento (Driver y Newton, 2000).

Ahora bien, no hay un consenso sobre la naturaleza de la relación entre el mundo natural y el conocimiento que tenemos de ese mundo. Se resumen a continuación las principales posturas epistemológicas actuales al respecto:

Realismo

La idea fundamental del realismo es que las teorías científicas describen el mundo tal como es (Chalmers, 1987). Casella y Giuliani (1999) distinguen dos formas epistemológicas realistas: el realismo de las teorías, y el realismo de las entidades teóricas que constituyen las teorías. Según el primero, cualquier teoría científica contrastada describe e interpreta la realidad del mundo natural. Por ejemplo, la teoría cinética de los gases describe cómo son en realidad los gases y cómo se comportan. El realismo de las entidades teóricas va un paso más allá, y admite la existencia real de toda entidad teórica, incluidas las cantidades físicas que se utilizan para describir propiedades. Así, para el realismo de las entidades teóricas, las partículas materiales constituyentes de los gases son reales, y tienen una masa y una carga que también existen como entidades del mundo natural.

Tanto Chalmers (1987) como Casella y Giuliani (1999) subrayan que el realismo establece, en cierto modo, una correspondencia directa entre teoría y verdad: cualquier teoría que describe correctamente algunos aspectos del mundo es cierta, y cualquier teoría es falsa si los describe incorrectamente.

La principal objeción a la perspectiva realista es inmediata: si se puede afirmar que una determinada teoría científica describe exactamente cómo es un determinado aspecto del mundo, es porque, al margen de la teoría, ya se conoce de antemano ese aspecto del mundo.

Instrumentalismo

Puede considerarse el instrumentalismo como la corriente opuesta al realismo, entendiendo ambos en su extremo más radical. De acuerdo con el instrumentalismo, todo concepto teórico no referido a entidades observables debe interpretarse como una ficción útil que facilita los cálculos sobre el mundo (Chalmers, 1987). Para el instrumentalismo, las únicas descripciones científicas que describen cómo es el mundo son aquéllas que solamente involucran conceptos referidos a las entidades observables, puesto que las observaciones son infalibles. En este sentido, el instrumentalismo coincide con el inductivismo en rechazar cualquier afirmación que no se deriva de la observación infalible.

Siguiendo con el ejemplo de la teoría cinética de los gases: según el instrumentalismo, las partículas de los gases son ficciones útiles elaboradas para explicar las observaciones que se han realizado sobre los sistemas gaseosos (lecturas de valores en un termómetro, medidas de presión en un manómetro…)

La objeción más contundente al instrumentalismo radica en la falsabilidad de las observaciones: la distinción absoluta entre observación (infalible) y teoría (falible) es contradictoria con la afirmación de que la observación está influida por la teoría, y también es falible. Recordemos que la falsabilidad es el criterio más adecuado para aceptar o rechazar un enunciado científico, según Popper (1983). La debilidad teórica del instrumentalismo también se demuestra por el hecho de que las teorías pueden conducir al descubrimiento de nuevos fenómenos observables. En el ejemplo de la teoría cinética de los gases (Chalmers, 1987): si las partículas de gas son ficciones teóricas, ¿cómo se explica el movimiento browniano? ¿Pueden colisionar unas ficciones teóricas con las partículas observables del humo?

Realismo no representativo

Entre los polos del realismo y del instrumentalismo, podemos situar la corriente en la que se encuadra nuestra visión de la Ciencia. Chalmers (1987) la denomina realismo no representativo.

Para el realismo no representativo, no se puede establecer una correspondencia entre teoría y verdad: el mundo físico es como es, independientemente de nuestros conocimientos sobre él. Las teorías científicas son constructos humanos que ofrecen interpretaciones sobre el mundo natural, a cuya naturaleza no podemos acceder directamente. Este realismo es no representativo en tanto que postula que la Ciencia es un producto social que tiene por meta acercarse a la verdad; ésta viene dada por la naturaleza del mundo físico y está totalmente al margen del conocimiento humano y fuera de su alcance.

Contrariamente al instrumentalismo, el realismo no representativo sostiene que las teorías de la Ciencia son aplicables a la realidad física independientemente de las situaciones experimentales a las que se enfrentan los investigadores.

Así pues, las teorías no describen el mundo tal como es, y la imposibilidad de acceder a la verdad impide juzgar hasta qué punto las descripciones científicas se ajustan a ella. Pero podemos valorarlas según su grado de éxito en interpretar algún aspecto del mundo, y aquí el realismo no representativo ofrece una respuesta más adecuada que las demás corrientes al dilema sobre la relación entre el mundo y el conocimiento científico: puesto que las teorías son constructos humanos no correspondientes con la verdad, puede que varias teorías diferentes ofrezcan descripciones e interpretaciones equivalentes, más o menos precisas o detalladas.

El realismo no representativo también explica el hecho de que varias formulaciones distintas de una misma teoría aporten representaciones muy

diferentes sobre una misma realidad (Chalmers, 1987), y permite analizar la evolución histórica de relación entre Ciencia y verdad sin caer en las contradicciones de la perspectiva realista radical. Según el realismo, si las teorías científicas son verdad, ¿cómo se explica su evolución a lo largo de la historia? Esta visión lineal o acumulativa de la historia de las teorías científicas ya fue criticada por numerosos autores como Kuhn (1971), Feyerabend (1975) o Lakatos (1978). Desde el realismo no representativo, se considera que las teorías son constructos sociales y, como tales, pueden estar sujetas a cambios. En algunos momentos históricos se produce una competencia directa entre dos o más teorías sobre el mismo aspecto del mundo. Para confirmar una teoría como la más adecuada entre las varias propuestas, los científicos evalúan cuál de ellas ofrece la interpretación más concluyente a la luz de las pruebas disponibles (Giere, 1994). La sustitución de unas teorías por otras a lo largo de la historia de la Ciencia se explica no tanto por la aparición de nuevos datos, sino sobre todo por la aparición de nuevas teorías con mayor capacidad interpretativa (nuevos paradigmas, para Kuhn, o nuevos programas de investigación, según Lakatos). Desde esta perspectiva, las teorías cobran un papel preponderante en el desarrollo del conocimiento científico.

En este punto, consideramos interesante resumir las ideas que Casella y Giuliani (1999) recogen sobre las observaciones de Einstein y Planck a propósito de la naturaleza y la epistemología de la Ciencia. Ambos defienden una posición epistemológica flexible que integra las posiciones filosóficas del realismo (porque, según Einstein, el científico supone la existencia de un mundo externo al individuo) y del instrumentalismo (que se pone de manifiesto, por ejemplo, en la construcción de predicciones científicas). La componente realista, según Planck, suele predominar cuando el científico se enfrenta a una realidad estable del mundo; ante los desequilibrios y las innovaciones, se impone la componente instrumentalista.

Desde nuestra perspectiva realista no representativa, la meta de cualquier rama de la Ciencia es la adecuada descripción de ciertos aspectos del mundo. En último término, la meta utópica de la Ciencia es la verdad absoluta, objetiva, a la que no podemos acceder sino a través de nuestros constructos sociales más potentes, las teorías científicas, cuyo objetivo es establecer una relación entre la realidad natural y el mundo de las impresiones sensoriales (Chalmers, 1987).

La Ciencia como proceso de construcción social de conocimiento: implicaciones para la enseñanza de las Ciencias

Sobre la base de las reflexiones que hemos desarrollado en el apartado anterior, afirmamos, de acuerdo con (Casella y Giuliani, 1999), que la comunidad científica debe asumir varias responsabilidades éticas y culturales. Entre ellas está involucrarse en la educación y difusión del conocimiento científico; más, teniendo en cuenta que en nuestra comunidad hemos integrado educación y Ciencia, y que la actual situación mundial hace cada vez más necesario diseñar estrategias y modelos

basados en el pensamiento científico, y aplicarlos a la vida cotidiana a nivel individual y colectivo (ver, por ejemplo, UNESCO, 1999; OCDE, 2005).

Así pues, antes de abordar el diseño de la metodología didáctica que constituye la variable independiente de esta investigación, se deben sentar las bases de una concepción de la Ciencia que tenga representación en el papel que juega la ciencia escolar en la sociedad de hoy.

En lo que respecta a la concepción de la Ciencia que pretendemos promover en la enseñanza, consideramos que se debe desterrar la visión de la Ciencia como un conjunto de hechos verdaderos sobre el mundo, o como una confrontación no problemática de hechos y fenómenos. Estas visiones eliminan la posibilidad de controversia y discusión (Geddis, 1991; Driver, 1994 *et al.*; Driver, Newton y Osborne, 2000), y por ello obstaculizan la capacidad de los alumnos para debatir sobre cuestiones sociocientíficas que, en muchos casos, les afectan de manera directa en sus vidas (Solomon, 1991; Norris y Phillips, 1994; UNESCO, 1999; OCDE, 2005). El Consejo Internacional para la Ciencia de la UNESCO advierte (1999):

«Hoy más que nunca es necesario fomentar y difundir la alfabetización científica en todas las culturas y todos los sectores de la sociedad, así como las capacidades de razonamiento y las competencias prácticas y una apreciación de los principios éticos, a fin de mejorar la participación de la ciudadanía en la adopción de decisiones relativas a la aplicación de los nuevos conocimientos…»

Suscribimos la idea de Hertz (en Casella y Giuliani, 1999) de que el objetivo más inmediato (y en cierto sentido el más importante) del conocimiento sobre la naturaleza es la predicción de futuros eventos, de manera que seamos capaces de resolver los problemas de la vida con suficiente antelación. Para Hertz, existe una continua interacción entre el mundo real, asumido, y el mundo de la Ciencia, construido. Nosotros, en la línea de Einstein e Infeld (1986), Driver, Newton y Osborne (2000) y Casella y Giuliani (1999), también destacamos la importancia de tener presente esta relación entre el mundo natural, cuya realidad asumimos como externa al ser humano, y el mundo del conocimiento científico, cuya realidad creamos como construcción humana. Estas ideas se recogen en la *Figura 1*:

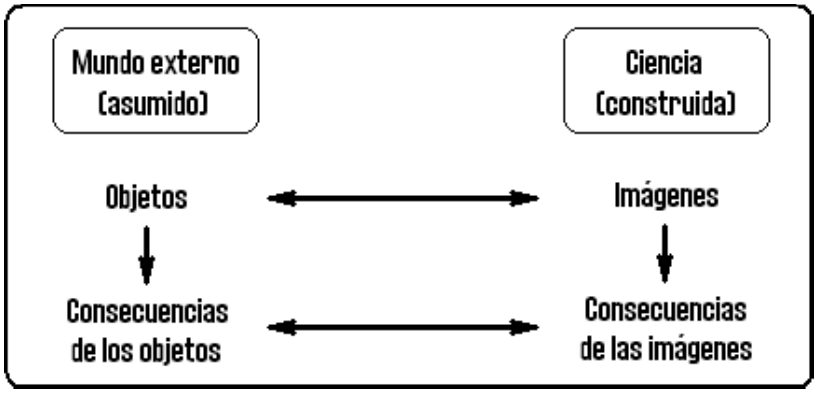


Figura 1: relación entre el mundo externo y la Ciencia (adaptado de Hertz, en Casella y Giuliani, 1999)

Un interesante modelo de los procesos que tienen lugar en la construcción del conocimiento científico es el Duschl y Erduran (1996), quienes proponen un "camino" o serie de pasos que se realizan para llegar a emitir teorías a partir de los datos en bruto (obtenidos de la observación y la experimentación). El primer paso es el que permite extraer, del conjunto de los datos en bruto, los datos duros o seleccionados, esto es, aquéllos a los que se presta atención en la investigación. Esta etapa también podría describirse como el paso de las observaciones a los datos, y requiere un análisis de la fiabilidad de las fuentes. Posteriormente, de los datos duros o seleccionados se infieren unas pautas que revelan en qué manera se relacionan los datos. En este paso se seleccionan y justifican las regularidades que merecen ser consideradas pautas. Después de identificarlas, se selecciona un marco teórico que sirve de base para formular interpretaciones o teorías que permiten explicar la existencia de las pautas. Este modelo de Duschl y Erduran (1996) establece grandes paralelismos entre los procesos de resolución de problemas y los procesos de construcción del conocimiento científico.

En el apartado anterior (*El mundo natural y el conocimiento científico*, pág. 15) hemos destacado la concepción de las teorías como base del conocimiento científico. La aceptación de las teorías influye de manera determinante en la forma de pensar y trabajar de los científicos (Hodson, 1992, 1998), y por ello se puede afirmar que constituyen una guía en la labor de quienes las comparten. Desde este punto de vista, el desarrollo de las teorías es esencial para la construcción social del conocimiento científico (Hodson, 1992, 1998; Giere, 1994; Duschl, 1997).

Aunque en la comunidad científica se da por ampliamente aceptada la concepción de la Ciencia como proceso de construcción social del conocimiento, en la enseñanza continúan influyendo sustancialmente diversas ideas relacionadas con la corriente positivista (Banet, 2007), que desde el punto de vista epistemológico deben darse por superadas (Chalmers, 1987).

Concepción positivista de la Ciencia, y su influencia en la enseñanza

Brown (1988) señala diferentes tendencias en el seno de la corriente filosófica positivista, y destaca dos en particular. Según este autor, el positivismo clásico de Comte se basa en el empirismo estricto, puesto que sólo admite aquel conocimiento directamente derivado de la experiencia. Por su parte, el positivismo moderno ha pasado a sostener la teoría verificacionista del significado, en especial a partir de las doctrinas del Círculo de Viena. Según la teoría verificacionista, una proposición contingente es significativa si, y sólo si, puede verificarse o refutarse a través de un método empírico, basado en la observación y la lógica; de lo contrario se la considera una pseudoproposición carente de significado.

La teoría verificacionista se topa con un gran obstáculo en su aplicación a las leyes científicas, proposiciones universales que no pueden confrontarse de manera concluyente a partir de un conjunto finito de enunciados de observación (Chalmers,

1987; Brown, 1988). De la reformulación de la teoría verificacionista surgió la corriente moderada del empirismo lógico, mediante la que se incorporó a las tesis clásicas del positivismo la estructura formal de la lógica y se reconoció la importancia del marco teórico en el que se trabaja en la resolución de los problemas. Esta nueva escuela positivista defiende la teoría de la confirmación gradualmente creciente, cuya tesis central afirma que, aunque toda proposición contingente debería confirmarse con la única ayuda de la observación y la experimentación, en la práctica no se necesitan resultados concluyentes para aceptarla como significativa; bastará con que los resultados del contraste proporcionen una confirmación gradualmente creciente de la proposición. Estos compromisos teóricos permiten considerar el empirismo lógico, más que como un cuerpo doctrinal, como un programa de investigación (Lakatos, 1978).

La corriente positivista ha tenido una duradera influencia en la enseñanza de las Ciencias, tanto en lo que se refiere al desarrollo de metodologías de enseñanza como a las perspectivas docentes. En la actualidad, las ideas positivistas continúan subyacentes en muchos profesores (Lakin y Wellington, 1994; Driver, Newton y Osborne, 2000; Banet, 2007), sobre todo en la concepción de la Ciencia como un proceso empírico en el cual observación y experimentación determinan los métodos para confirmar las afirmaciones sobre el conocimiento, y, por tanto, la formulación de conclusiones y generalizaciones ha de basarse en la inducción a partir de las observaciones (Hodson, 1992; Giere, 1994; Duschl, 1997 Hodson, 1998).

Según diversos autores (por ejemplo, Cleminson, 1990), la aplicación del llamado "método científico" a la enseñanza nació de la conjugación de estos métodos inductivistas con la visión de la enseñanza centrada en el papel activo del que aprende. Los movimientos de renovación curricular de los años sesenta y setenta difundieron el método como la serie presuntamente universal de procesos que los científicos utilizan en la construcción del conocimiento; en consecuencia, se consideró que las propuestas metodológicas debían adaptarse a esta secuencia universal. La idea de la existencia de un método científico único fue muy discutida ya en los años 70 (por ejemplo, por Feyerabend, 1975), dada la complejidad de los procesos con los que trabajan los científicos. De hecho, en los siglos pretéritos no se utilizaba el método científico (al menos, no sistemáticamente), y la Ciencia avanzó notablemente en la interpretación del mundo.

A propósito del método científico como panacea para el aprendizaje de las Ciencias, Driver, Newton y Osborne (2000) afirman que estas orientaciones metodológicas que pretenden reducir los métodos de construcción del conocimiento a uno solo y universal, caen en la misma equivocación que las tendencias que pretendían unificar el proceso de evolución histórica de las Ciencias sobre la base de generalizaciones. Para la epistemología y la filosofía de la Ciencia, no hay pruebas empíricas que sugieran la existencia de una serie identificable de procesos cuya secuencia conforme un método científico. O, dicho de otro modo, no hay un único

método para construir conocimiento en Ciencias (Sanmartí, 2002). Las destrezas que se utilizan en el trabajo científico (observar, encontrar semejanzas, identificar regularidades, elaborar explicaciones…) tienen mucha relación con el funcionamiento cognitivo y no son específicas de la actividad científica.

En cuanto a la influencia del positivismo en el diseño de metodologías de enseñanza, en los años ochenta (Millar y Driver, 1987) plantearon un sólido argumento que cuestiona directamente las bases teóricas del enfoque positivista: la dicotomía entre contenidos y procesos de la Ciencia es artificial y simplista, puesto que aprender contenidos científicos implica necesariamente desarrollar procesos (principalmente de tipo cognitivo), y el aprendizaje de los procesos de la Ciencia se realiza sobre conceptos concretos. Más adelante, cuando abordemos las componentes del proceso de aprendizaje (*Componentes del aprendizaje*, pág. 35), discutiremos las relaciones entre las componentes declarativa y procedimental del conocimiento (por ejemplo, Pozo y Gómez Crespo, 1998) y sobre sus implicaciones en la enseñanza y aprendizaje de las Ciencias Experimentales.

Producción del conocimiento científico

Hemos comentado la concepción del conocimiento científico (y particularmente de las teorías) como un constructo humano no correspondiente con la verdad, y hemos planteado la influencia que tiene la aceptación de las teorías en la forma de pensar y trabajar de los científicos que las asumen. Teniendo en cuenta estas reflexiones podemos considerar, en la línea de Driver, Newton y Osborne (2000), que la componente sociológica es clave para comprender la Ciencia y el conocimiento científico. En el desarrollo de su actividad, los científicos se ven influenciados por multitud de factores morales y culturales, derivados de sus convicciones y compromisos personales, y relacionados con los valores e idearios representativos de la sociedad de su época. Estos factores socioculturales pueden determinar las motivaciones y los métodos de investigación, e intervenir en los razonamientos en los que se apoyan las afirmaciones sobre el conocimiento. En resumen, el discurso de los investigadores puede variar en función del contexto en que se produzca. A este respecto, Driver, Newton y Osborne (2000) proponen cuatro contextos que son escenario de las acciones discursivas de los científicos:

- en la mente de un científico, cuando éste, como individuo que realiza actividad científica, diseña experiencias o interpreta datos;
- en un grupo de investigación, donde varios científicos desarrollan su actividad dentro de un programa de trabajo conjunto, guiado por los compromisos teóricos del grupo y la base empírica;
- en la comunidad científica, por lo general a través de interacciones entre científicos que sostienen posiciones competitivas en conferencias, mesas redondas…, o bien a través de publicaciones especializadas;

- y en el dominio público, donde los científicos establecen un campo de discusión a través de medios de comunicación, con el propósito de exponer y defender sus teorías en competición.

Cuando los científicos elaboran explicaciones de hechos y fenómenos del mundo natural, se comunican entre sí buscando ordenar y sustentar sus enunciados, y de esta manera dotarlos de una cierta credibilidad (Latour y Woolgar, 1995). El nuevo conocimiento no se da a conocer en un ámbito público hasta que ha resistido una revisión por parte de varias instituciones científicas. Durante este proceso, otros investigadores examinan y critican los enunciados propuestos, los someten a prueba, los evalúan en competencia con enunciados alternativos… Esta actividad, que permite generar Ciencia de calidad, está relacionada con la concepción del conocimiento científico como un conocimiento público que se construye mediante el consenso en el seno de una comunidad (Driver, Newton y Osborne, 2000). Desde la Sociología de la Ciencia, algunos autores observan que la evolución del conocimiento se ve cada vez más influida por el creciente consenso de la comunidad científica (Phillips, 1998; Slezak, 1998). Si la componente sociológica cobra cada vez mayor importancia en la generación de nuevos conocimientos científicos, entonces cada vez adquiere más sentido concebir la Ciencia como un proceso de construcción social del conocimiento (Driver, Newton y Osborne, 2000).

Esta visión de la Ciencia no niega importancia a la observación y la experimentación, pero sí revaloriza frente a ellas el papel que juegan las prácticas discursivas en la evolución del conocimiento científico, socialmente construido. En efecto, razonamiento y argumentación están en el corazón de la Ciencia (Driver, Newton y Osborne, 2000), puesto que modelan los procesos mediante los que los investigadores establecen afirmaciones sobre el conocimiento.

Driver, Newton y Osborne (2000) y Giere (1999) analizan los procesos implicados en el establecimiento de afirmaciones sobre el conocimiento en Ciencias, y los relacionan en un modelo de razonamiento científico que consideramos adecuado como referente para el contexto de nuestra investigación:

De acuerdo con estos autores, establecer una afirmación sobre el conocimiento en Ciencias requiere más procesos y más complejos que generalizar enunciados mediante la inducción a partir de las observaciones realizadas. Para empezar, las observaciones y los experimentos permiten obtener una serie de datos, que hay que revisar para discriminar cuáles son válidos. Después de esta revisión, se verifica hasta qué punto los datos seleccionados están de acuerdo o en desacuerdo con la predicción correspondiente, que previamente se había formulado mediante el razonamiento deductivo y el cálculo. Mediante una confrontación de los datos (extraídos del mundo mediante la observación y la experimentación) y la predicción (elaborada a partir de la teoría mediante el razonamiento deductivo y el cálculo) se evalúa en qué extensión la teoría encaja con la realidad del mundo.

Este modelo de razonamiento entraña una concepción de la Ciencia en la cual observación y experimentación no constituyen la base sobre la que se construye el conocimiento, sino que se utilizan como recursos auxiliares en la generación de argumentos con los que apoyar las afirmaciones que se van a contrastar (*Figura 2*).

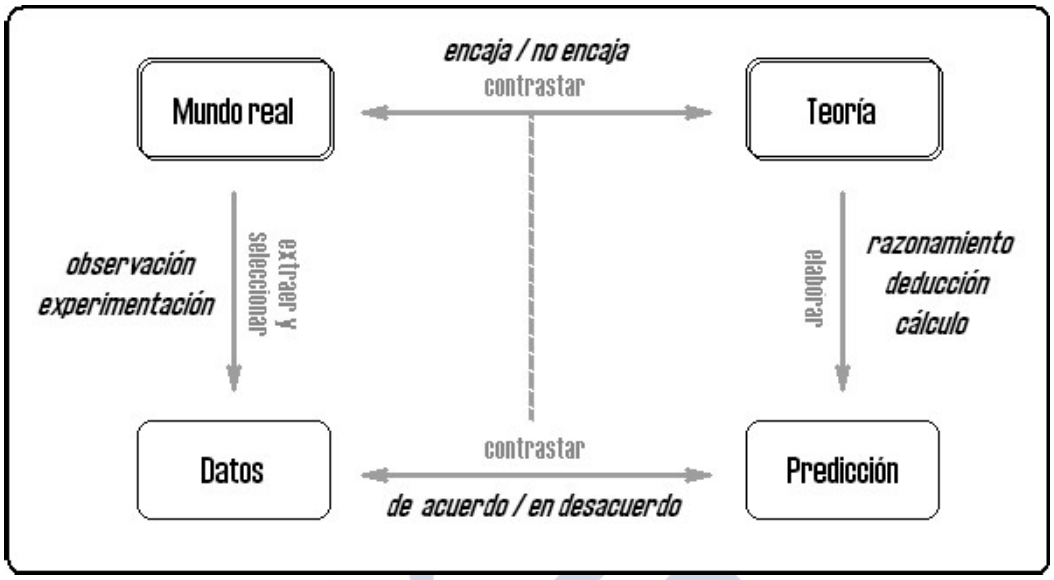


Figura 2: modelo de razonamiento científico (adaptado de Giere, en Driver, Newton y Osborne, 2000)

Según los defensores del enfoque positivista, la Ciencia es una actividad que confronta los hechos de manera no problemática. La influencia actual de este enfoque en la enseñanza de las Ciencias (Banet, 2007) se concreta en aspectos como las baterías de "problemas" entendidos como preguntas cerradas, en las que la transformación mecánica de los datos lleva, invariablemente y sin controversia, hacia una respuesta correcta y conclusiones sobre las que existe acuerdo unánime. Las consecuencias de esta visión positivista se pusieron de manifiesto en los años noventa: la ocultación de la controversia científica ante los sucesos históricos (Geddis, 1991; Driver, Asoko, Leach, Mortimer y Scott, 1994) y la obstaculización del aprendizaje de destrezas que capacitan para argumentar sobre cuestiones sociocientíficas a las que, cada vez más, los estudiantes tienen que hacer frente en sus vidas (Solomon, 1991; Norris y Phillips, 1994; UNESCO, 1999; OCDE, 2005).

Al contrario que el enfoque positivista, la nueva perspectiva sobre la naturaleza y la epistemología de la Ciencia propone acercar los procesos de construcción del conocimiento científico a los alumnos (Duschl, 1997), potenciando la relevancia de la componente social de la Ciencia, fomentando el aprendizaje del conocimiento procedimental o estratégico mediante el desarrollo de las destrezas de razonamiento y argumentación, lo que por otra parte contribuirá al éxito académico (Duschl, 1995). Se pretende que los estudiantes adquieran conciencia de que la práctica científica es una actividad compleja y socialmente construida (Latour, 1992; Hodson, 1992, 1998), y de que las prácticas discursivas de razonamiento y

argumentación juegan un papel principal en el establecimiento de afirmaciones sobre el conocimiento en Ciencias. Esta posición tiene importantes consecuencias para la concepción de la enseñanza de las Ciencias, y la más inmediata es que el aprendizaje en Ciencias integra tres componentes:

Además de la componente cognitiva que incluye el *corpus* del conocimiento científico, han de incluirse una componente social y otra contextual, que destacan la importancia del trabajo cooperativo en la construcción del conocimiento científico en el contexto del aula. Más adelante (*Componentes del aprendizaje*, pág. 35, y *Fundamentos de la metodología*, pág. 290) se desglosan las tres componentes.

I.3.1.2. Ciencia formal y ciencia escolar: la transposición didáctica

En Didáctica de las Ciencias se considera alcanzado un consenso sobre la necesidad de hacer asequible a los estudiantes el conocimiento científico, reelaborándolo para ellos. La traducción de la Ciencia formal a una ciencia escolar supone diferenciar qué conocimiento es interesante y relevante, cuál es interesante y relevante para el alumnado, y adaptarlo de manera que se ajuste a las etapas y características del proceso de enseñanza y aprendizaje. Cabe diferenciar la Ciencia formal (la aceptada por la comunidad científica) de la ciencia escolar que utiliza la comunidad docente en el aula; ambas son diferentes, a su vez, de la ciencia de los alumnos, entendida como la que éstos construyen (Halwachs, 1983; Jiménez, 1991).

Se conoce como transposición didáctica al proceso de reelaboración de la Ciencia formal que tiene la finalidad de hacer asequibles, interesantes y significativos los constructos científicos a los alumnos (Chevallard, 1985). Como resultado de este proceso, no siempre explícito, a partir de la Ciencia formal se obtiene la ciencia escolar (Chevallard, 1985; Jiménez y Sanmartí, 1997). O, dicho de otro modo: mediante la transposición didáctica, un objeto de saber científico se transforma en un objeto de saber para la enseñanza (*Figura 3*).

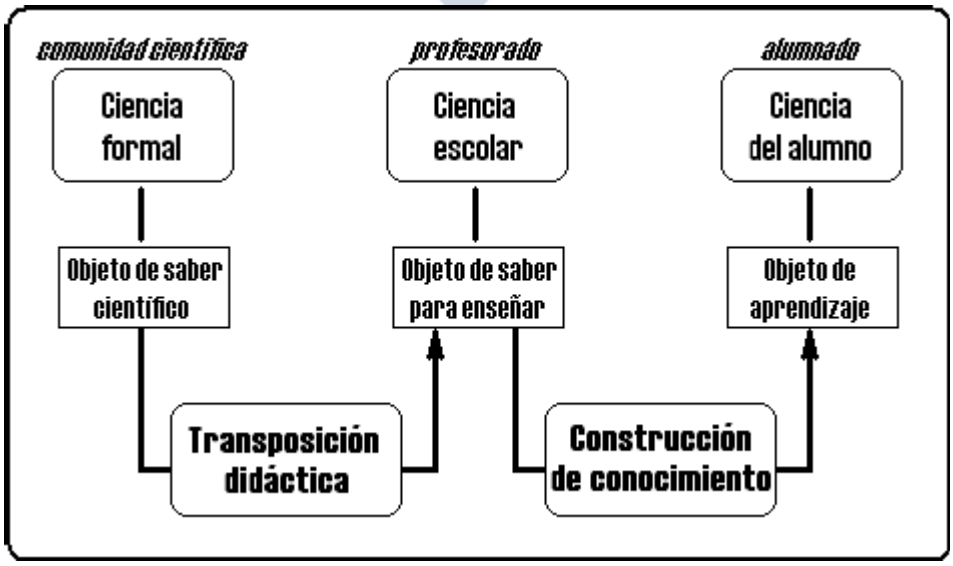


Figura 3: el proceso de transposición didáctica

Recientemente, en varias publicaciones se han analizado las principales características y finalidades de la ciencia escolar (Domínguez Castiñeiras, 2000; Valcárcel y Sánchez, 2000; Domínguez Castiñeiras y Álvarez, 2001), y alguno de estos análisis es fruto de trabajos desarrollados en nuestro grupo de investigación. En la *Figura 4* se muestran las finalidades que atribuimos a la ciencia escolar, en consonancia con varias investigaciones desarrolladas en los años noventa (Gil, 1986; Duschl, 1995; Vázquez y Manassero, 1995; Pro, Hernández y Saura, 1997):

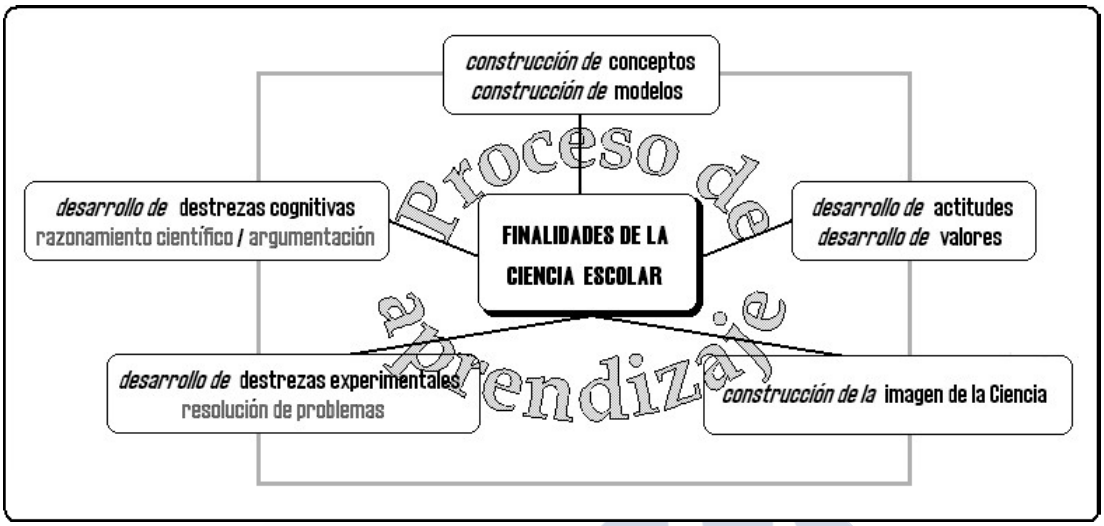


Figura 4: finalidades de la ciencia escolar

Relacionados con estas cinco finalidades de la ciencia escolar, se plantean varios interrogantes clave:

- ¿Qué conceptos se han de considerar objeto de aprendizaje, y qué modelos interpretativos se han de construir como fundamento de la interpretación de hechos, fenómenos y acontecimientos?
- ¿Qué destrezas cognitivas se han de fomentar como adecuadas para desarrollar un aprendizaje significativo? En particular, ¿se ha de promover el desarrollo del razonamiento y de la argumentación?
- ¿Constituye la resolución de problemas un método adecuado para el desarrollo de destrezas experimentales?
- ¿Qué actitudes y valores han de desarrollar los estudiantes para construir una imagen actualizada de la Ciencia?

Ante esta problemática, la línea de investigación en la que se encuadra esta Tesis Doctoral está centrada en la elaboración de instrumentos para dar respuesta a los interrogantes planteados (*Fundamentos de la metodología*, pág. 290), y la presente investigación aborda este reto en el ámbito de conocimiento de la Termodinámica de los procesos químicos.

Partimos del convencimiento de que la enseñanza de las Ciencias debe orientarse en la dirección que apuntan las finalidades de la ciencia escolar, y

encaminarse a que los estudiantes logren un aprendizaje significativo de conceptos, modelos y procedimientos científicos útiles para interpretar situaciones, hechos y fenómenos del mundo natural, y a que adquieran actitudes y valores que les permitan construir una imagen actualizada de la Ciencia y de la actividad científica.

Tenemos muy presente que la enseñanza de las Ciencias debe fomentar el desarrollo del razonamiento y la argumentación como destrezas cognitivas adecuadas en el aprendizaje significativo tanto de los conceptos, modelos y procedimientos, como de las actitudes y valores deseables desde la ciencia escolar (*Ciencia formal y ciencia escolar: la transposición didáctica*, pág. 25). Y, en este punto, manifestamos nuestro convencimiento de que es el profesorado el que debe adoptar la mayor parte de las decisiones curriculares, de acuerdo con el nuevo modelo docente que se defiende desde la investigación en Didáctica de las Ciencias y desde las recientes reformas educativas en España y en Europa: un profesor activo, práctico, reflexivo e investigador de aula (Shón, 1993; OCDE, 2005; *El nuevo modelo de profesorado*, pág. 63). El profesor ha de plantearse los interrogantes que hemos enunciado, y las decisiones que tome sobre los principios metodológicos y las estrategias de evaluación han de armonizar con las finalidades de la ciencia escolar.

Dejada constancia de nuestra perspectiva sobre estos aspectos, en el siguiente apartado se continúa con el desarrollo del marco teórico que guía esta Tesis de Doctorado, y pasan a exponerse los resultados actuales de la investigación en Didáctica de las Ciencias sobre el proceso de aprendizaje.

I.3.2. El proceso de aprendizaje en las Ciencias Experimentales

Las teorías científicas son formas contrastadas de razonar sobre el mundo que nos rodea, constituyen la base del razonamiento justificativo y dirigen las estrategias del trabajo en Ciencias, porque configuran un conocimiento integrado de los objetivos, conceptos y métodos de la Ciencia.

Según Hodson (1998), esta perspectiva permite integrar los principios filosóficos y psicológicos que hacen posible el desarrollo de un mejor conocimiento sobre el aprendizaje de las Ciencias. Para detallar estos principios, se dedica un apartado al establecimiento del concepto de aprendizaje (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27), y otro a caracterizar las tres componentes del mismo: cognitiva, social y contextual (*Componentes del aprendizaje*, pág. 35).

I.3.2.1. El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social

¿Cómo aprenden los estudiantes? Hace décadas se consideraba que la estructura cognitiva de los alumnos funciona de manera análoga a la de los docentes, salvando la diferencia de que la de éstos contiene el conocimiento de la ciencia escolar, mientras que la de aquéllos puede compararse con un recipiente vacío, que mediante la enseñanza se espera llenar con el conocimiento deseable.

Pero, desde hace varias décadas, las investigaciones en el campo de la psicología han demostrado que la mente no es una *tabula rasa*, un molde o una página en blanco en la que se van registrando informaciones. Los resultados de la investigación psicológica nos permiten afirmar que la mente es una entidad activa que reacciona ante las experiencias de la vida del individuo y, a través de la coordinación de las acciones de éste, modifica los conocimientos que se poseen.

Pasamos ahora a resumir las principales aportaciones de la investigación sobre la naturaleza del aprendizaje, comenzando por la psicología cognitiva y pasando luego a la perspectiva constructivista para llegar al marco del constructivismo social, en el que se sitúa la presente investigación. El objetivo de este apartado es definir el aprendizaje como un proceso de construcción de conocimientos que sucede en unas determinadas condiciones sociales y contextuales. Por este motivo, en los apartados que vienen a continuación solamente se presenta una síntesis de los modelos que permiten llegar a esta definición; en el apartado correspondiente a las *Componentes del aprendizaje* (pág. 35) se describen con más detalle las implicaciones de estos enfoques sobre la enseñanza.

Las aportaciones de la psicología cognitiva al estudio del aprendizaje

Desde la psicología cognitiva, desarrollada con profusión en la década de los ochenta (Head, 1985; Norman, 1985, 1987; Rumelhart, 1989), se considera que las ideas están organizadas en una estructura cognitiva idiosincrásica en la cual se incluyen todos los conocimientos de la persona. La estructura cognitiva no existe en el individuo desde su nacimiento, sino que éste la va construyendo a medida que adquiere y ordena sus conocimientos en función de las experiencias vitales que va acumulando. La forma en que se asimila la nueva información depende de la estructura cognitiva ya existente (Head, 1985).

Este enfoque explica por qué las facultades mentales se desarrollan a lo largo de toda la vida, y por qué la estructura cognitiva de los estudiantes no coincide con la de los profesores: la mente de un alumno, lejos de registrar fielmente los contenidos "transmitidos", reacciona ante ellos y los asimila sobre la base de los conocimientos que ya están en su estructura idiosincrásica, resultado de su previa interacción con el mundo. El funcionamiento de la mente de los estudiantes se rige por unos procesos y mecanismos específicos diferentes de los que dirigen el funcionamiento de la mente de los profesores de Ciencias.

Desde la perspectiva de la psicología cognitiva, aprender un nuevo campo de conocimiento significa construir estructuras cognitivas apropiadas y realizar adecuadamente ciertos procesos mediante los cuales la mente transforma e integra la nueva información (Otero, 1989; Posner, Strike, Hewson y Gertzog, 1982).

Dado que la organización de la enseñanza debe adaptarse a los mecanismos de pensamiento de los alumnos, la elección de los contenidos objeto de aprendizaje

se debe completar mediante un análisis conceptual de los mismos (*TAREA 1.- Selección, organización y secuenciación de los contenidos*, pág. 313) que permita seleccionar aquellos conceptos, modelos, y procedimientos que sean psicológicamente asequibles para el alumnado. En resumen, a la hora de organizar la enseñanza se hace esencial conocer en profundidad los procesos mentales de los estudiantes (Halwachs, 1983).

Si se admiten estas consideraciones sobre la relación entre el aprendizaje y el procesamiento de la información, cobra sentido la función de la mente como procesadora de símbolos: mediante la estructura cognitiva, el individuo establece conexiones entre el mundo real y su representación simbólica, y de esta manera es capaz de interpretar sus observaciones sobre el mundo (Rumelhart, 1989). Este procesamiento de símbolos implica necesariamente una estructura cognitiva (Newell, Rosenbloom y Laird, 1989) que está vinculada con dos aspectos clave:

En primer lugar, tiene que ver con la construcción del lenguaje (Pinker, 1989) y con la utilización de un discurso significativo (Grosz, Pollak y Sidner, 1989). En segundo lugar, también se relaciona con la comprensión y la resolución de problemas (Smith, 1989; VanLehn, 1989).

Muchos estudios procedentes de distintos campos de conocimiento ponen de manifiesto que en la comprensión y el uso del lenguaje intervienen no sólo las funciones lingüísticas, puesto que el lenguaje no consiste únicamente en sintaxis y semántica (Barwise y Etchemendi, 1989). La sintaxis y la semántica son esenciales en la adquisición del lenguaje hablado y escrito (Pollatsek y Rayner, 1989) y su uso en la comunicación (Grosz *et al.*, 1989), pero también son fundamentales ciertas funciones no lingüísticas, entre las que destacan el aprendizaje de categorías (Smith, 1989), la construcción de modelos de la actividad del mundo (Johnson-Laird, 1989) y la utilización de la heurística en la resolución de problemas (VanLehn, 1989). Para la psicología cognitiva, aprender Ciencias requiere que los alumnos se familiaricen con los símbolos que utilizan los científicos (Newell *et al.*, 1989). Comparten esta perspectiva autores como (Martí y Pozo, 2000), que abogan por establecer un dominio específico de conocimiento en el que se incluyan las representaciones externas permanentes (escritura, números, mapas, gráficos…) Estos resultados de la investigación se desarrollan a continuación, en el siguiente apartado.

Para ilustrar estas ideas, Claxton (1987) aplica la "metáfora del conocimiento científico" sobre el aprendizaje, entendido como construcción de conocimiento:

Los constructos personales son, como los constructos científicos, formas de representación; en este sentido y hasta cierto punto, el aprendizaje equivale a la construcción de modelos científicos. En efecto, los constructos personales se atienen a una serie de convenios, tienen un determinado campo de validez y unas limitaciones, y dirigen la atención hacia ciertos aspectos, desviándola de otros.

El aprendizaje como proceso de construcción de conocimiento: perspectiva constructivista

Cada individuo elabora sus propias interpretaciones a partir de la información que recibe a través de los sentidos. Así, el que aprende es el protagonista indiscutible de su propio aprendizaje, porque las bases de este proceso son las ideas y los conceptos personales creados a lo largo de la vida, que no tienen por qué coincidir con los conocimientos de otros individuos. Distintas personas pueden interpretar e integrar como conocimiento una misma información de manera diferente.

La comunidad científica en el campo de la Didáctica de las Ciencias Experimentales ha alcanzado un consenso mayoritario en lo que se refiere al aspecto constructivista de la adquisición de conocimientos (Resnick, 1983; Driver y Oldham, 1986; Novak, 1988; Carretero, 1993; Duit, 1996; Duit y Treagust, 1998; Novak, 1988, 1991; Gil, Carrascosa *et al.*, 1999). El conocimiento no se transmite sin más a un alumno que, dada su naturaleza de ente pasivo, ha de ser provocado mediante acciones internas o externas. Desde la orientación constructivista se considera que el estudiante es espontáneamente activo (Bodner, 1986; Driver y Oldham, 1986), que reacciona de manera dinámica a las experiencias de su vida (incluidas las relacionadas con el aula de Ciencias), y, sobre la base de éstas, desarrolla un proceso idiosincrásico de elaboración de conocimientos.

Este proceso es el aprendizaje, una construcción de significados que tiene lugar mediante el establecimiento de relaciones entre las concepciones que ya se tienen, modificándolas o adaptandolas (Resnick, 1983). Esta noción de aprendizaje (Kelly, 1955; Inhelder y Piaget, 1972; Piaget, 1978) está fundamentada en teorías científicamente aceptadas del campo de la Psicología y se basa, en buena medida, en las investigaciones de Piaget sobre epistemología genética, en la teoría del aprendizaje significativo de Ausubel, y en la teoría sociohistórica de Vigotsky, que es la base del constructivismo social.

Para Piaget (1978), las sucesivas estructuras cognitivas de un individuo se generan incorporando las anteriores, más simples, en otras de mayor complejidad. El nivel de desarrollo cognitivo determina el aprendizaje, que es un proceso de reorganización cognitiva con el que se trata de resolver las contradicciones que aparecen en nuevas situaciones o contextos. En esencia, la estructura cognitiva tiende a mantenerse, y el individuo utiliza los conocimientos que ya posee para adquirir otros nuevos. El aprendizaje es un proceso interno, y las relaciones sociales lo favorecen en el sentido de que proporcionan las contradicciones necesarias para buscar el equilibrio entre la asimilación y acomodación de ideas.

Ausubel (1963) considera que el aprendizaje consiste en la incorporación de un cuerpo de conocimientos organizados a la estructura cognitiva, y para que dicho aprendizaje sea significativo se requiere, entre otras condiciones, que los nuevos

conocimientos se relacionen de manera sustancial y no arbitraria con los que el individuo ya posee. Así pues, los conocimientos anteriores de la persona determinan la posibilidad de incorporación de más conocimiento.

Vygotsky (1979) considera que la adquisición y la utilización del conocimiento forman parte del proceso de socialización de la persona; ésta es la idea central de la teoría del origen sociocultural de los procesos psicológicos superiores. Todo aprendizaje es inicialmente interpsicológico (social) y se interioriza como intrapsicológico (individual); el proceso de internalización supone la integración y el establecimiento de nuevas relaciones en la estructura cognitiva interna del individuo, si la información o la práctica nuevas tienen un valor significativo dentro de dicha estructura. Al ser un proceso social, el aprendizaje depende del contexto sociocultural, histórico e institucional. En el siguiente apartado (página siguiente) se continúa el desarrollo de las ideas de Vygotsky a este respecto.

La importancia de la óptica constructivista en Didáctica de las Ciencias es innegable. De hecho, dos de los aspectos centrales del constructivismo constituyen la base de varios modelos de aprendizaje que han obtenido una gran aprobación entre los investigadores del área (Jiménez, 1996b; Saura, 1996). Estos dos aspectos centrales se pueden resumir como sigue:

- Los conocimientos de los estudiantes están relacionados entre sí, constituyendo verdaderas estructuras de conocimiento, y
- el proceso de aprendizaje supone un cambio en las estructuras de conocimiento individuo.

Desde la perspectiva constructivista, pues, el aprendizaje no consiste en una acumulación de ideas aisladas, sino en el cambio dinámico de las estructuras cognitivas en las que se integran los conocimientos de la persona (Jiménez Aleixandre, 1996a, 1996b, 2000, 2003; Saura, 1996; Rodrigo y Cubero, 2000). El aprendizaje que desarrolla cada estudiante depende de sus estructuras cognitivas, de sus estrategias cognoscitivas (modos de aprender) y de su predisposición emocional, sobre todo en lo que se refiere a los intereses y propósitos personales (Novak, 2002). Por ello, en la enseñanza de las Ciencias debe ponerse atención no sólo a los medios para transmitir la información que integra el conocimiento deseable: además ha de tenerse en cuenta que el alumno convertirá la información en conocimiento al integrarlo en sus estructuras cognitivas idiosincrásicas.

Como cada persona utiliza sus propios conocimientos para interpretar el mundo en el que vive, es probable que no perciba, o que desestime o rechace cualquier nueva información que no se ajuste a sus propios conceptos. Cuando una nueva experiencia fuerza un cambio en alguno de los conceptos, tradicionalmente se considera que el individuo ha aprendido de la experiencia, o aprendido de una manera dura (Ollerenshaw y Ritchie, 1997). Desde el constructivismo se señala que

modificar o abandonar un concepto como consecuencia de la experiencia es una acción creativa de la que sólo el sujeto es consciente. Este control sobre el propio aprendizaje se conoce como metaaprendizaje. En este sentido, Otero (1990) distingue entre dos variables del aprendizaje: una es la que denomina variable cognitiva, constituida por los esquemas cognitivos de la persona, y la otra es la variable metacognitiva, representada por el control de la comprensión. Pero no ha de confundirse metaaprendizaje con metaconocimiento: éste, definido por Novak y Gowin (1988), se refiere al conocimiento que un individuo tiene sobre la estructura de su propio conocimiento y el proceso de su producción.

El constructivismo social

A finales del siglo pasado se publicaron algunos trabajos en los que se cuestionaban tanto la validez del constructivismo en la enseñanza de las Ciencias y la eficacia de las propuestas didácticas basadas en él, como las bases filosóficas sobre las que se asienta (Suchting, 1992; Matthews 1994; Solomon 1994; Ogborn, 1996; Marín 1999). Sin embargo, las principales objeciones al constructivismo se basan en interpretaciones reduccionistas y estereotipadas de sus planteamientos, como afirma Gil, Carrascosa *et al.*, (1999) cuando comenta las críticas de Suchting (1992) y Matthews (1194). Estos estereotipos y simplificaciones se dirigen sobre todo contra el modelo del aprendizaje como cambio conceptual, que ya se puede considerar superado, como comentaremos en *Secuencias de enseñanza* (pág. 66). En algunos casos, tienden a interpretarse de manera literal o superficial ciertos fundamentos teóricos constructivistas, que se tratan como si fueran simples metáforas. Esto es lo que sucede en la crítica de Solomon (1994) a la metáfora de Kelly sobre el papel de los alumnos como científicos, o en la de Ogborn (1996) contra la expresión "construir conocimiento". En todo caso, sigue existiendo un amplio consenso en la concepción constructivista del aprendizaje y en el éxito de las orientaciones constructivistas para lograr un aprendizaje significativo, y así lo reflejan los estudios exhaustivos y refrendados que aparecen en los *handbooks* (Gabel, 1994; Fraser y Tobin, 1998). El consenso constructivista tiene un gran valor porque ha sobrevivido a dos grandes dificultades: a la consolidación de la Didáctica de las Ciencias, que es relativamente reciente (Perales Palacios y Cañal de León, 2000; Adúriz y Izquierdo, 2002; Sanmartí, 2002; Oliva, 2005), y a la generalidad y vaguedad que ha adquirido el término constructivismo por su aplicación en tantos y tan diferentes contextos (Carretero y Limón, 1996). El modelo constructivista no es unívoco ni unitario, pero está fundamentado en teorías aceptadas del campo de la psicología y ha demostrado su eficacia en el área de la Didáctica de las Ciencias.

El desarrollo del constructivismo en los años 80 y su amplia aceptación por parte de los investigadores ha supuesto la aparición de diversas corrientes dentro del modelo constructivista a lo largo de las décadas siguientes (Carretero y Limón, 1996). Autores como Marín, Jiménez, y Solano (1999) consideran que existe una

corriente mayoritaria dedicada a la búsqueda de un consenso para conciliar todas las ideas clave desarrolladas por la investigación, y otras corrientes minoritarias entre las que podemos destacar la piagetiana, la ausubeliana, la radical o la social.

El constructivismo social (Vygotsky, 1964, 1979), en el marco del cual nos situamos, parte de la premisa de que el que aprende realiza la construcción activa e idiosincrásica de su propio conocimiento. El aprendizaje se ve claramente influido por los contextos social y cultural del individuo, que intervienen en las concepciones que éste va construyendo sobre el mundo. Por esta razón, el constructivismo social insiste en la necesidad de lograr un ambiente social y cultural óptimo para favorecer el aprendizaje. Un entorno adecuado requiere una interacción abierta y dinámica entre los distintos protagonistas del escenario de enseñanza y aprendizaje, así como estrategias de instrucción que generen el mayor número posible de oportunidades para que los alumnos interaccionen con sus iguales (compañeros) y con el experto (profesor). La comunicación establecida en este entorno de trabajo facilita la construcción del conocimiento entre todos los participantes.

Las bases teóricas más explícitas del constructivismo social se encuentran en las aportaciones realizadas por L. Vygotsky en lo que respecta a la influencia del entorno social, cultural e institucional sobre los procesos mentales humanos; hasta tal punto que algunos autores (Hodson y Hodson, 1998) consideran que es la incorporación de las ideas vygotskianas la que marca el paso del constructivismo al constructivismo social.

Vigotsky distingue dos tipos de procesos psicológicos: los procesos elementales, comunes al ser humano y a más especies animales, y los procesos psicológicos superiores, que son específicamente humanos. Dado que el desarrollo de las funciones mentales superiores está articulado por la mediación instrumental y psicológica, en consecuencia la acción humana está mediada por herramientas técnicas y por herramientas psicológicas o símbolos (estas ideas han sido ampliamente desarrolladas por Wertsch (1993). Una herramienta insustituible en el aprendizaje es el lenguaje, que permite al individuo el control voluntario de sus propias acciones y la internalización de las habilidades interpsicológicas (en el plano social) como intrapsicológicas (en el plano personal). El desarrollo de las funciones mentales superiores progresa en la extensión en la que el individuo haga suyas las habilidades interpsicológicas adquiridas en la interacción con los demás, y logre así la posibilidad de actuar por sí mismo de forma consciente y responsable.

Si se considera que toda función mental superior se gesta en un plano social y luego se internaliza, entonces el aprendizaje es una actividad social y colaborativa que depende de la estructura cognitiva y del entorno social del que aprende. La interiorización de los nuevos conocimientos, adquiridos y controlados en situaciones de interacción social, capacita al individuo para enriquecer sus interacciones personales, lo cual propicia nueva situaciones de aprendizaje.

Vygotsky (1979) propone el establecimiento de zonas de desarrollo evolutivo para interpretar los límites o niveles de acción de una persona, atendiendo a las funciones que ya es capaz de realizar (zona de desarrollo real), a las que están en estado embrionario (zona de desarrollo próximo) y a las que no son alcanzables en un determinado estado evolutivo del individuo (zona de desarrollo potencial). Vygotsky centró sus estudios en las interacciones entre un niño y un adulto, pero estas nociones son perfectamente extrapolables a un contexto social más complejo, donde intervengan más voces (Wertsch, 1993).

La zona de desarrollo real se caracteriza por las tareas que un individuo puede desempeñar solo, sin ayuda. La zona de desarrollo próximo (ZDP) se define como la distancia entre el nivel real y el nivel que puede alcanzar con la ayuda de otros individuos de capacidades análogas a él. Así pues, la ZDP viene representada por el espacio entre dos niveles evolutivos de desarrollo: el que un estudiante ya tiene, y el que puede alcanzar mediante la interacción *inter pares*. La zona de desarrollo potencial se refiere a la distancia que existe entre el nivel de desarrollo real de una persona y el nivel que ésta alcanza con la ayuda de un individuo más capaz o más competente. Así pues, la zona de desarrollo potencial viene determinada por lo que un estudiante puede lograr en la realización de una tarea recurriendo a la interacción con un experto (en el aula, con el profesor).

Desde la perspectiva del constructivismo social, los procesos de enseñanza y aprendizaje deben desarrollarse en la ZDP, donde se desencadena el proceso de construcción de conocimiento. Es labor del docente ajustar su interacción con los estudiantes y regular las que éstos mantienen entre sí, de manera que se maximice el número de situaciones de trabajo en las que los alumnos realicen tareas situadas en un nivel de desarrollo intermedio entre lo que pueden hacer solos y lo que pueden realizar con ayuda de otros (*El nuevo modelo de profesorado*, pág. 63). Cuanta mayor sea la cantidad y la calidad de las situaciones de aprendizaje y de los instrumentos de mediación, más conocimientos serán accesibles.

Al avanzar en el proceso de aprendizaje, el nivel de desarrollo real de cada persona se desplaza hacia niveles superiores (es lo que se conoce como evolución del conocimiento), y el establecimiento de cada nuevo nivel evolutivo se verá acompañado de un cambio en la delimitación de la ZDP. De esta manera, el progreso en la construcción de conocimientos posibilita sucesivas ZDPs cada vez más avanzadas. Esto quiere decir que se van convirtiendo en efectivos ciertos aprendizajes que antes solamente estaban próximos a construirse, y que se avanza en la consecución de tareas que antes requerían un mayor nivel de ayuda, pero que cada vez se tienen menor dificultad, hasta que se llega a la autonomía total en la realización de la tarea, con lo cual ésta queda incluida en el nivel de desarrollo real.

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta ahora, se puede afirmar que el aprendizaje es un proceso continuo y dinámico de construcción de conocimientos,

que tiene por protagonista al que aprende. En el proceso de aprendizaje influyen tanto la estructura cognitiva del individuo (componente cognitiva) como las características del contexto sociocultural, histórico e institucional (componentes social y contextual). Con la finalidad de profundizar en estos aspectos y llegar a extraer implicaciones para la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias, en el siguiente apartado se analizan las tres componentes del aprendizaje.

I.3.2.2. Componentes del aprendizaje

En el aprendizaje del conocimiento científico se pueden diferenciar las tres componentes siguientes:

- ***La componente cognitiva***: La estructura cognitiva de los estudiantes actúa como un verdadero marco teórico referencial que condiciona el aprendizaje.
- ***La componente social***: Para que se produzca una evolución en los conocimientos, es condición necesaria la implicación de los estudiantes en su propio aprendizaje. Cobran importancia la interacción entre los alumnos y el desarrollo de las prácticas discursivas en el aula, y el progreso en el razonamiento individual y en la argumentación en grupo depende de factores de tipo cognitivo y social. Los factores cognitivos hacen referencia a la estructura cognitiva idiosincrásica del argumentador, la cual condiciona la naturaleza y evolución de sus argumentos. En cuanto a los factores sociales, las relaciones dentro del grupo intervienen de manera determinante en el proceso de argumentación.
- ***La componente contextual***: No debe olvidarse que el alumno aprende en un contexto de aula de Ciencias, trabajando en el seno de un grupo. El desarrollo de los perfiles personales de razonamiento y argumentación se ve influido por el papel que asumen los miembros del grupo y por la participación de todos y cada uno en la elaboración de argumentos. En resumen, las destrezas de razonamiento y argumentación se trabajan siempre en un contexto determinado que condiciona el desarrollo y la integración de los factores de tipo cognitivo y social.

A continuación se exponen diversos aspectos relacionados con las componentes del aprendizaje. Dada la complejidad de todas ellas, a cada una se le dedica un apartado específico.

Componente cognitiva del aprendizaje

En este apartado se analizan la naturaleza y las características de las ideas de los alumnos en Ciencias, así como sus posibles implicaciones para la enseñanza y el aprendizaje. A renglón seguido, se revisan las principales aportaciones de la investigación en Psicología y Didáctica sobre las vías mediante las que construimos el conocimiento que poseemos. Entre estas aportaciones destacamos la teoría de los

esquemas, en la que se basa el análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción que se realiza en esta investigación de Tesis (*TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje*, pág. 449).

Las ideas de los alumnos en Ciencias

Resumiendo lo que hemos expuesto hasta este punto, en los resultados de la investigación en Psicología se encuentran los fundamentos teóricos de la visión del aprendizaje como construcción de conocimientos, que nos permiten afirmar que la mente de los alumnos dista mucho de ser una *tabula rasa*. Las características idiosincrásicas condicionan el aprendizaje de cada estudiante. Por este motivo, el constructivismo otorga especial importancia a las estructuras de conocimiento con las que los alumnos llegan al aula.

La aplicación de los modelos constructivistas a la enseñanza de las Ciencias requiere conocer las ideas que los estudiantes han desarrollado sobre los fenómenos naturales como consecuencia de sus experiencias vitales. Son numerosísimas las investigaciones que se han realizado al respecto desde hace décadas en todo el mundo, y todas coinciden en señalar que los niños y adolescentes adquieren conocimiento sobre el objeto de las Ciencias en muchos y muy diversos medios y contextos (Giordan, 1985, 1989; Giordan y Vecchi, 1988; Driver, 1986, 1988; Driver, Guesne y Tiberghien, 1989; Hierrezuelo y Montero, 1989; Osborne y Freyberg, 1991). Entre estos medios se encuentra la escuela, que dista con mucho de ser el único entorno de influencia en el conocimiento sobre el mundo natural.

Con frecuencia, las ideas de los alumnos en Ciencias no coinciden con los conocimientos propuestos desde la ciencia escolar, y van a influir de manera determinante sobre el aprendizaje que se pretende desarrollar en el aula.

Antes de entrar a analizar esta cuestión, tenemos que puntualizar el significado que atribuimos a las expresiones "ideas de los alumnos en Ciencias" o "ideas alternativas": aquéllas con las que los estudiantes llegan al aula, y que en ocasiones difieren tanto de las científicamente aceptadas que encierran, más que diferencias semánticas, creencias muy alejadas o percepciones completamente diferentes sobre el mismo aspecto del mundo (Posada, 2000; González, Morón y Novak, 2001). En la investigación se encuentra un sinfín de términos lingüísticos para referirse a ellas (García y Rodríguez, 1988; Jiménez, Solano y Marín, 1994): preconcepciones, preconceptos, ideas previas, esquemas alternativos, ciencia de los niños, ciencia del sentido común, errores conceptuales, obstáculos de aprendizaje…

Hoy disponemos de una abundante literatura sobre las ideas alternativas de los estudiantes en muchos y diversos ámbitos de la Química y la Física, y en contextos educativos de diferentes países. Podemos destacar, entre otros, la recopilación de Driver, Brook y Briggs (1990) para el contexto anglosajón, o las de Furió (1996, 2006), en España. La actualización reciente más completa es quizá la de (Duit, 2004).

Se han realizado numerosos tipos de análisis a las ideas de los alumnos, desde distintas clasificaciones sistemáticas hasta interpretaciones basadas en las principales corrientes psicológicas del momento (ver, por ejemplo: Gustavo, 1987). Como resultado de los muchos estudios realizados hasta la fecha (Driver, 1986, 1988; Driver *et al.*, 1989; Pozo *et al.*, 1992; Pozo, 1996; Furió, 1996; Pintó, Aliberas y Gómez, 1996; Furió, Solbes y Carrascosa, 2006), podemos afirmar que las ideas de los alumnos comparten las siguientes características:

- Tienen un soporte discursivo, lingüístico y comunicativo diferente al utilizado por la comunidad científica

Si reconocemos las tres componentes del aprendizaje a las que hemos aludido (cognitiva, social y contextual), necesariamente hemos de considerar el lenguaje como vehículo del aprendizaje. Las concepciones de los estudiantes se ven condicionadas por las diferencias e interferencias entre el léxico cotidiano y la terminología científica (Lloréns, 1987; 1989). Dada la relación entre el lenguaje, la experiencia cotidiana y el aprendizaje, no es de extrañar que las ideas de los alumnos abarquen todas o prácticamente todas las áreas científicas (Furió, Solbes y Carrascosa, 2006).

Los estudiantes de los primeros niveles educativos tienen una visión antropocéntrica de sus experiencias y no consideran necesario cuidar la precisión del lenguaje, como tampoco sienten la necesidad de que sus explicaciones sean coherentes con respecto a una gran variedad de fenómenos. Además, al tener en cuenta las propiedades más que las interacciones, sus razonamientos tienden a basarse en el análisis de los estados cambiantes en detrimento de los de equilibrio. Debido a estas características, las ideas de los alumnos en los niveles educativos básicos son por lo general limitadas, se relacionan con contextos muy específicos para cada fenómeno o situación y no suelen interrelacionarse en estructuras globales de conocimientos que permitan interpretar situaciones similares utilizando conceptos análogos.

Sin embargo, en algunos casos estas colecciones de ideas específicas conforman estructuras de conocimiento alrededor de algunas concepciones cercanas a las científicas, de tal manera que pueden utilizarse como concepciones ancla (Clement, 1993) en el proceso de enseñanza y aprendizaje.

- En general, presentan una gran resistencia al cambio

Los resultados de la investigación han constatado que algunas de las ideas de los alumnos tienden a mantenerse extraordinariamente estables a lo largo de muchos niveles de la enseñanza (Cleminson, 1990; Chi *et al.* 1994; Duit, 1994; Garnett *et al.* 1995). Una posible causa de esta permanencia es que, aunque tales ideas no formen un sistema conceptual consistente desde el punto de vista lógico, sí resultan coherentes y significativas desde la perspectiva del estudiante, y el sentido que han

adquirido como resultado de la experiencia las hace oportunas o satisfactorias para describir e interpretar los hechos y situaciones de la vida diaria. En efecto, las ideas cotidianas nos permiten predecir con éxito una gran variedad de acontecimientos futuros y, de esta manera, tener un cierto control sobre ellos (Pozo, 1992) y guiarnos en el mundo que nos rodea.

- Muchas de las ideas de los alumnos guardan cierta relación con ideas mantenidas por la comunidad científica a lo largo de la historia

La tesis principal de una de las líneas más destacadas en la investigación en Didáctica de las Ciencias durante la década de los noventa (Gagliardi, 1988; Pro *et al.*, 1997) parte de una analogía entre el proceso de superación de los obstáculos epistemológicos a los que se ha enfrentado la Ciencia en su evolución a lo largo de la historia, y los auténticos obstáculos de aprendizaje que suponen las ideas alternativas. Aunque hace décadas que se cuestiona la existencia de una correspondencia estricta entre las concepciones de los estudiantes y los obstáculos epistemológicos superados por la Ciencia, admitir un cierto paralelismo ayuda a profundizar en las dificultades a las que se enfrentan los niños y adolescentes en la evolución de sus conocimientos iniciales hacia los conocimientos científicos (Saltiel y Viennot, 1985; Driver *et al.*, 1989). En el campo de la Termodinámica, en particular, este paralelismo se manifiesta en el hecho de que algunos alumnos sostienen ideas sobre el calor idénticas o muy parecidas a las de algunos modelos científicos hoy abandonados, como la teoría del calórico, que se comenta en *La energía y sus procesos de transferencia (calor y trabajo)*, en la pág. 145.

- Se observa cierto grado de universalidad entre las ideas de los alumnos, en el sentido de que éstas varían en función de culturas y países de procedencia

Se ha constatado un claro nivel de coincidencia en las concepciones de los estudiantes procedentes de muy distintas culturas y países. Puede resultar paradójico que compartan tantos significados, dada la enorme diversidad de experiencias los que proceden de sociedades tan diferentes entre sí.

Esta característica facilita en gran medida la labor investigadora en lo que se refiere a establecer predicciones sobre las vías de conceptualización que se desarrollan en una determinada edad o rango de edades en relación con un problema concreto (Duit, 1994). No obstante, a la hora de investigar estas ideas comunes a diferentes culturas, han de tenerse en cuenta las diferencias lingüísticas.

- En algunos campos específicos de conocimiento, se constata una progresiva evolución de las concepciones del alumnado a lo largo de la escolaridad

Si bien algunas ideas de los alumnos se mantienen extraordinariamente estables a lo largo de extensos períodos de instrucción, otras, por el contrario, experimentan una evolución significativa durante la etapa escolar, y se observa que se relacionan con determinados campos de conocimiento, como la situación de la

Tierra en el espacio (Nussbaum, 1989a; García Barros, Mondelo Alonso y Martínez Losada, 1996). El cambio de ideas es gradual, y existen momentos o épocas en las que bastantes elementos sustanciales de antiguas teorías se mantienen intactos mientras se produce la incorporación de elementos asociados a nuevas teorías (ideas mixtas). Los resultados de la investigación pueden relacionarse con las aportaciones de Vygotsky (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27) sobre las ZDPs y las poblaciones de conceptos en evolución (Escaño y Gil de la Serna, 1994).

Orígenes y causas de las ideas de los alumnos en Ciencias

La concepción del aprendizaje como construcción de conocimientos explica el hecho de que los estudiantes sostengan ideas sobre los fenómenos naturales antes de acceder al aprendizaje escolar de la Ciencia (Driver *et al.*, 1989). El interrogante que se plantea inmediatamente es: ¿de dónde proceden este tipo de ideas? Para responder a esta pregunta ha de aludirse a más de una fuente de origen, porque las concepciones personales están en relación directa con las impresiones sensoriales y con la influencia del entorno sociocultural, tanto en el contexto escolar como en los numerosos contextos no escolares (Pozo, 1992; Pozo y Gómez Crespo, 1998).

Se enumeran a continuación las principales fuentes que la investigación ha identificado como origen de las ideas de los estudiantes:

- La experiencia personal y la cultura de la comunidad en que vive el alumno

Parte de los conocimientos que construimos tienen su origen primario en nuestras impresiones derivadas de la percepción sensorial, que relacionamos desde niños a través de las "ideas del sentido común". El sentido común (Wolpert, 1994) compendia la información que acumulamos sobre nuestras experiencias vitales, y éstas condicionan las ideas que vamos desarrollando. Un ejemplo ilustrativo de este condicionamiento es la influencia de las observaciones del movimiento de los cuerpos. En la vida diaria observamos que, al dejar deslizar un cuerpo sobre una superficie, éste tenderá a detenerse si no se le aplica alguna fuerza; esta experiencia puede inducirnos a pensar que, para mantener un cuerpo en movimiento, se requiere la concurrencia de fuerzas (Gunstone y Watts, 1989; Osborne, 1991).

Además de las experiencias y observaciones personales de la vida diaria, es evidente que la cultura propia de cada civilización modela en gran medida nuestras interpretaciones (Jiménez, Analadejo y Caamaño, 1992; Pozo, 1996b)

- El razonamiento de los estudiantes

En *Nivel de abstracción, demanda conceptual, manejo simultáneo de variables y construcción de razonamientos complejos en la Termodinámica* (pág. 128) se detallan las formas más comunes de razonamiento espontáneo; aquí incluimos un breve apunte sobre la predisposición al razonamiento causal lineal (Rozier y Viennot, 1991; McDermott, 1993a y b), que se relaciona con la marcada tendencia de los niños de temprana edad a analizar los estados cambiantes en detrimento de los de equilibrio.

Los razonamientos causales lineales relacionan un evento o fenómeno con una cadena o secuencia de efectos que se consideran producidos por una o varias causas identificables, las cuales operan sobre el sistema objeto de estudio en orden temporal, temporo-espacial o espacial. Esta tendencia se aprecia en algunas de las ideas alternativas que se han identificado en el ámbito de la Termodinámica (*Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica*, pág. 123). Por ejemplo, al analizar un sistema consistente en el contenido de una cazuela al fuego, tienden a establecer vínculos direccionales entre el fuego, que es fuente emisora de energía por calor, y la cazuela, receptora de la energía (Erikson, 1980; Tiberghien, 1980; Castiñeiras, 2000).

Volviendo al ámbito de la Dinámica Clásica, según Barral (1990), los alumnos suelen reconocer la actuación de una fuerza sobre un cuerpo cuando éste se halla en movimiento, pero les cuesta considerar la existencia de fuerzas que actúan sobre sistemas en equilibrio estático. Esta dificultad puede tener su origen en la tendencia a explicar únicamente los cambios motivados por una causa identificable. En este caso, la causa es una fuerza; si no existe movimiento en el sistema, parece no haber ninguna causa que produzca un cambio.

El modelo de razonamiento causal lineal obstaculiza la interpretación de los estados de los sistemas, y de los procesos que se suceden simultáneamente unos a otros o que cuentan con múltiples causas que operan sobre el sistema. Además, añade otros obstáculos al aprendizaje, y uno de los más sobresalientes es la dificultad de visualizar los procesos inversos a los conocidos. Por ejemplo, según Tiberghien (1989), los estudiantes suelen reconocer que un aporte de energía puede causar en un sistema un cambio de estado de sólido a líquido ("la energía rompe los enlaces"). Siguiendo el modelo de razonamiento causal lineal, la energía se percibe como una acción sobre el sistema, que causa la ruptura de enlaces en éste. Como consecuencia de esta acción, el proceso global implica un cambio de estado en el sistema. Sin embargo, los que sostienen este modelo de razonamiento causal lineal tienen dificultades para interpretar la solidificación de un líquido como un proceso causado por el mecanismo contrario al descrito. Esta dificultad de interpretar los procesos inversos a los conocidos se traduce, por ejemplo, en problemas para comprender la reversibilidad termodinámica de los procesos (*Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica*, pág. 123).

- Los medios de comunicación

Los medios de comunicación proporcionan acceso a gran cantidad de información y a multitud de experiencias. Su influencia en nuestra sociedad es muy potente, tanto por su gran difusión como medios de masas (libros, prensa, radio, televisión, internet…), como por la cierta autoridad social que han alcanzado, sobre todo en lo que se refiere a la veracidad de la información y al eco de las percepciones y costumbres sociales. Si además tenemos en cuenta el alto nivel de

abstracción de muchos de los conceptos y modelos científicos, no es de extrañar que tanto los medios de comunicación como otros contextos puedan reforzar ideas alternativas que concuerdan en cierto sentido con el conocimiento adquirido en la vida cotidiana (Gómez Crespo, 1996).

Así, por ejemplo, la población acepta como veraces las ideas que se divulgan en los partes meteorológicos de la televisión, y esto puede inducir a considerar científicamente adecuadas ciertas expresiones alternativas, como "el sol saldrá a las 8 h" o "el calor de los termómetros subirá hasta los 25 grados centígrados".

- La acción de la instrucción escolar

La confluencia y mutua influencia de la instrucción formal y de las experiencias personales suele generar una gran diversidad de aprendizajes poco esperados (Wandersee, Mintzes y Novak, 1994). Por otra parte, desde el entorno escolar a veces se refuerzan o generan ideas no coincidentes con las científicas, debido al lenguaje que utilizan los profesores o que aparece reflejado en los materiales en los que los docentes se apoyan para desarrollar los contenidos objeto de aprendizaje (Summers, 1983; Frederik, Van der Valk, Leite y Thorén, 1999).

La forma de hablar del profesorado puede promover ideas alternativas a las de la ciencia escolar. En el ámbito de la Termoquímica y la Termodinámica Química se encuentran múltiples palabras y expresiones cuyo significado científico está lejos de los significados cotidianos, como es el caso de "vamos a calcular el calor intercambiado" (Frederik *et al.*, 1999) o de otros que se revisan en *Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica* (pág. 123). La interpretación de una información depende de los esquemas de conocimiento del individuo que la procesa (*La indagación sobre el proceso de aprendizaje. La teoría de los esquemas*, pág. 43). Por este motivo, los docentes deben prestar atención a las expresiones que utilizan en el aula de Ciencias (Bacas, 1997; Lemke, 1997), porque distintos estudiantes pueden atribuir diferentes significados al mismo enunciado, y es posible que estas interpretaciones difieran de las de la ciencia escolar.

En cuanto a los materiales de enseñanza, algunos libros de texto contienen errores recurrentes (Leite, 1999), y parece que el tema de Termodinámica es uno de los que más inercia didáctica acusan a este respecto (*Propuestas y materiales de enseñanza en Termoquímica y Termodinámica Química*, pág. 198). Por citar un ejemplo muy difundido, consideremos el concepto de calor, cuyo tratamiento en algunos textos puede reforzar las ideas del mundo cotidiano con expresiones como "un cuerpo caliente tiene más calor que un cuerpo frío", o "la temperatura mide la cantidad de calor que tiene un cuerpo" (Michinel y D'Alessandro, 1994).

También los modelos analógicos pueden inducir o promover ideas alternativas difíciles de modificar. Entre ellos podemos citar el modelo del átomo como pequeño sistema solar, o el de la electricidad como un fluido material (Gilbert

y Osborne, 1980; Domínguez *et al.*, 1995).

Implicaciones de las ideas de los alumnos para la enseñanza de Ciencias

Uno de los objetivos que se pretenden alcanzar con la escolarización es acercar el conocimiento cotidiano de los estudiantes al conocimiento científico. Para lograrlo, caben las siguientes opciones (Ollerenshaw y Ritchie, 1997):

- Ignorar y evitar el conocimiento previo de los estudiantes, y basar la enseñanza únicamente en el programa curricular

Se puede abordar la enseñanza ignorando las ideas con las que los alumnos llegan al aula. Sin embargo, desde la investigación educativa se advierte que este enfoque puede fomentar una compartimentalización del pensamiento de los que aprenden, y esto acrecienta el riesgo de que tiendan a relegar el conocimiento científico al *status* de poco o nada útil salvo para responder cuestiones escolares y preguntas en los exámenes, mientras que el conocimiento cotidiano sigue siendo funcional en la resolución de cualquier problema de la vida diaria. Una posible consecuencia es que el estudio de las Ciencias pase a carecer totalmente de valor y credibilidad para algunos, por la manifiesta disparidad entre el conocimiento científico y su propio conocimiento. También puede que lleguen a considerar la Ciencia como un conjunto de reglas y fórmulas sin significado ni relación con sus experiencias, y que por ello se decanten por no participar en el aprendizaje (Arnay, 1997)… lo cual no implica que dejen de memorizar aquella serie de relaciones conceptuales y ecuaciones o fórmulas sin sentido que les permitan acceder a los niveles superiores de enseñanza.

- Considerar el conocimiento previo de los estudiantes como punto de partida para construir el conocimiento deseable (de la ciencia escolar)

Puesto que las ideas de los alumnos no tienen por qué ser incompatibles con las de la ciencia escolar, diversos autores defienden que se puede llevar a cabo una estrategia de intercambio (Hewson, 1981) que sirva para hacer evolucionar los preconceptos hasta que alcancen un buen grado de coherencia con los conocimientos deseables. De hecho, se han documentado casos en los que esto llega a suceder (Jiménez, 1991). Años después de su propuesta, el propio Hewson (1989) sugirió el desarrollo de varias estrategias para lograr la captura conceptual, que puede concebirse como una forma de aprendizaje significativo.

Partiendo de la hipótesis de que, en determinadas condiciones, los alumnos pueden sustituir sus ideas alternativas por las de la ciencia escolar, Posner *et al.* (1982) desarrollaron el modelo del aprendizaje como cambio conceptual (*Secuencias de enseñanza*, pág. 66). Para lograr el cambio conceptual, en la instrucción se pueden utilizar determinadas ideas previas como concepciones ancla (Clement, 1993). En todo caso, son los estudiantes los que deben decidir si los conocimientos de la ciencia escolar tienen más utilidad y funcionalidad para interpretar los fenómenos y

situaciones propuestos (Hewson y Beeth, 1995), y, si así es, cambiar sus concepciones en favor de las nuevas.

Desde hace años, la identificación del constructivismo con el estudio de los conocimientos espontáneos o iniciales de los alumnos ha llegado a distorsionar algunas percepciones del modelo didáctico constructivista (Marín y Jiménez, 1992). Pero la investigación de las ideas alternativas no constituye en el constructivismo una finalidad en sí misma, sino un punto de partida en el diseño de las propuestas e intervenciones didácticas (Clough y Driver, 1986). No importa tanto identificar las ideas alternativas como analizarlas para decidir cómo se pueden trabajar para que los estudiantes avancen en su aprendizaje, encontrando sentido a los contenidos de Ciencias y relacionando los conocimientos declarativos, procesuales y emocionales.

Desde esta óptica, se hace imprescindible adaptar los contenidos de las asignaturas de Ciencias a las necesidades de la sociedad actual, y para ello se deben adoptar una serie de decisiones sobre qué enseñar (seleccionar los contenidos), cuándo y cómo hacerlo (planificar la intervención)… Las directrices propuestas por las administraciones educativas son de gran ayuda en esta labor, pero no cabe duda de que la mayor parte de estas decisiones hemos de tomarlas los diseñadores de propuestas didácticas encaminadas a favorecer un aprendizaje significativo de la ciencia escolar. Es esto lo que hará posible traducir el *curriculum* en un conjunto de actividades con las que se ayude a los estudiantes a construir una concepción del mundo y de la Ciencia más próxima a la de los científicos.

En este sentido, nuestras decisiones sobre este tema están influenciadas por nuestra concepción de la naturaleza y epistemología de la Ciencia (*Revisión de las principales perspectivas sobre la naturaleza y epistemología de la Ciencia*, pág. 15) y por nuestra visión del proceso de enseñanza y aprendizaje de la Ciencia, que se desarrolla en los apartados siguientes (*Implicaciones para la enseñanza de las Ciencias*, pág. 61). Nos apoyamos en el trabajo de Osborne y Freyberg (1991) para expresar nuestra convicción de que la enseñanza de las Ciencias no puede seguir teniendo los mismos fundamentos y contenidos que hace medio siglo, porque tanto la Ciencia misma como su contexto sociocultural han cambiado. Por este motivo, necesitamos romper con el hermetismo académico de la ciencia escolar sustentado sobre la base tendenciosa de que no hay más posibilidades de enseñanza que aquéllas que se utilizaron para enseñar a los que hoy son docentes (Osborne y Freyberg, 1991). Han de revisarse los fundamentos y contenidos de las asignaturas de Ciencias, y replantearlos según el poder explicativo, la inclusividad, la generalidad y la relacionabilidad que aportan a los contextos culturales de las sociedades actuales.

La indagación sobre el proceso de aprendizaje. La teoría de los esquemas

Se han aplicado varias metodologías de investigación para poner de manifiesto las ideas de los alumnos en diferentes ámbitos del conocimiento (Solano *et al.*, 2000). Entre los métodos más utilizados encontramos las entrevistas, los

cuestionarios de lápiz y papel, los problemas abiertos, las cuestiones de predicción-observación-explicación (Caamaño, 1992), los mapas conceptuales, los diagramas de Venn, la V de Gowin…

Desde hace varias décadas, se han realizado muchos estudios sobre el diagnóstico de ideas alternativas aisladas; pero en los años ochenta comenzó a advertirse que las teorías de las concepciones alternativas y del cambio conceptual no eran suficientes para comprender cómo se producen y evolucionan los conocimientos. La resistencia al cambio de un concepto por otro sugiere que probablemente, desde el punto de vista psicológico, los conceptos se representan en la memoria del individuo formando unidades coherentes más complejas, en las que están relacionados según los contextos que les dan significación. Si se intenta sustituir un concepto por otro, se alteran el universo de significados y la coherencia de las relaciones que se refieren al contexto (Gutiérrez, 2004). Comenzaron entonces a abrirse paso en la Didáctica de las Ciencias algunas investigaciones que pretendían esclarecer cómo se relacionan las ideas en el pensamiento. Los planteamientos de estas investigaciones parten de la hipótesis, ya expuesta en esta Memoria (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27), de que los estudiantes desarrollan teorías personales que conforman verdaderas estructuras de conocimiento (Claxton, 1987, 1994). Mediante la enseñanza, se pretende que los alumnos aprendan con y contra las representaciones (Giordan, 1989), que sean conscientes de la existencia de estas estructuras, que las sopesen en comparación con las teorías de la Ciencia y que poco a poco modifiquen sus estructuras de pensamiento para acercarlas a las científicas a lo largo de una serie de estados intermedios que deben valorar cuidadosamente (Hills, 1989). El proceso por el que se producen cambios en las estructuras de pensamiento es, en sí, aprendizaje.

¿Cómo tiene lugar la modificación de las estructuras cognitivas, esto es, el aprendizaje? ¿Qué factores condicionan la incorporación de nueva información a estas estructuras? Las investigaciones de Ausubel, Novak y Hanesian (1983), que tratan de responder a estas preguntas, son la base de la teoría del aprendizaje significativo. Según esta teoría, un aprendizaje significativo es aquél mediante el que se establecen nuevas relaciones en la estructura cognitiva a partir de la interacción del individuo con la nueva información. El aprendizaje significativo requiere, en primer lugar, la comprensión del significado de la nueva información. Además, el sujeto ha de interpretar la información para llegar a incluir en su estructura cognitiva los conocimientos nuevos. El aprendizaje significativo se pone de manifiesto en la capacidad del individuo para transferir la información procesada a nuevas situaciones y contextos en los que no ha sido probada todavía.

Frente al aprendizaje significativo podríamos situar el memorístico o, según prefiere llamarlo Ausubel, repetitivo (el aprendizaje significativo también implica la utilización de la memoria). El aprendizaje repetitivo se define como aquél que se produce cuando el que aprende incorpora la nueva información sin relacionarla con

su estructura cognitiva. Esta asimilación tiene lugar por repetición de la información, lo que hace que ésta se mantenga en la memoria durante un tiempo; pero se olvida con facilidad, por la falta de significado que tiene para el individuo. El excesivo énfasis de la enseñanza memorística en el aprendizaje de términos científicos sin relacionar su significado con los problemas en el marco de cuya explicación adquieren sentido, tiende a generar situaciones como la que describe (Jiménez Aleixandre, 2003): un alumno puede definir la fotosíntesis como el proceso de nutrición de las plantas, y a continuación afirmar que el geranio se alimenta de la tierra contenida en una maceta. Este alumno ha asimilado por repetición la información sobre la fotosíntesis, sin incorporarla con significado a su estructura cognitiva. Recuerda la definición de la palabra "fotosíntesis", pero descontextualizada del marco interpretativo que explica la síntesis de materia orgánica por parte de los organismos fotosintéticos, y por este motivo no es capaz de aplicar el concepto memorizado a la interpretación de un fenómeno como la nutrición del geranio que está en una maceta, sobre la repisa de la ventana del aula.

En consonancia con los epistemólogos actuales, la perspectiva constructivista sostiene que la relación entre nosotros y la información del mundo que nos rodea no viene dada porque extraigamos datos de la realidad para encontrar cuál es su sentido; más bien, la realidad sólo adquiere sentido para nosotros en la medida en que la vamos construyendo (Driver, 1986).

Desde el actual consenso constructivista en la Didáctica de las Ciencias, se pretende que los estudiantes desarrollen un aprendizaje significativo, distinto al repetitivo que predomina en los modelos de enseñanza tradicionales basados en el fomento de la memoria a corto plazo, mantenida a fuerza de presión para aprobar los exámenes (Novak, 1991). El aprendizaje significativo se produce cuando el alumno utiliza su conocimiento para generar nuevo conocimiento, relacionando la nueva información y la que ya se encuentra estable y bien diferenciada en su estructura cognitiva. Estas relaciones se establecen de forma sustancial y no arbitraria (Ausubel *et al.*, 1983): sustancial, porque la nueva información se incorpora a la estructura cognitiva con un significado concreto; y no arbitraria, porque esta incorporación se establece de acuerdo con las relaciones significativas que el individuo ya tenía en su estructura cognitiva.

Basándonos en la teoría del aprendizaje significativo, podemos postular que la mente del que aprende se organiza en unas estructuras conceptuales concretas, cuya utilización para procesar información requiere que el individuo ponga en marcha una serie de estrategias concretas. Atendiendo a las relaciones o proposiciones que vinculan los conceptos en estas estructuras, se puede establecer una cierta jerarquía conceptual, en el sentido de que unos conceptos se pueden considerar más o menos inclusores de otros. El significado completo de un concepto está integrado por todas las proposiciones que lo vinculan con los demás y por las connotaciones asociadas, las cuales se derivan de la experiencia personal y de los

contextos en los que se adquieren tales conceptos (contexto de aprendizaje). Esta reflexión, no antagónica con la óptica constructivista, puede ayudar a interpretar los mecanismos de un proceso tan complejo como es el aprendizaje (Novak, 1988).

En resumen, podemos considerar que los conocimientos incluyen una serie de conceptos, proposiciones y símbolos a los que cada individuo atribuye un significado concreto dentro de una estructura jerárquica, en la que existe una red de orden inclusivo entre los conceptos y las proposiciones. Utilizando estas estructuras idiosincrásicas, el individuo interacciona con el medio en el que vive e interpreta los fenómenos y situaciones a los que se enfrenta.

Se han propuesto multitud de modelos y técnicas para esclarecer las estructuras conceptuales en las que se postula que se organiza la mente humana. Entre las técnicas más influyentes destaca la de los mapas conceptuales (Moreira y Buchweitz, 1987; Novak y Gowin, 1988), cuya difusión y trascendencia le ha merecido un monográfico del *Journal of Research in Science Teaching* (Vol. 27, Nº. 10, 1990); a nivel internacional, numerosos autores la han juzgado muy útil en la exploración de la construcción de las ideas de los alumnos y en la investigación de relaciones significativas (Sciaretta, Silli y Vicentini-Missoni, 1990; Wallace y Mintzes, 1990; Roth y Roychoudhury, 1993; Liu y Hinchey, 1993; Markham, Mintzes y Jones, 1994). En España, Saura (1996) dedicó una amplia revisión al uso de los mapas conceptuales en la investigación en Didáctica de las Ciencias, incluyendo su funcionalidad en la representación simbólica de conocimientos científicos, su interés como recurso didáctico y sus ventajas para seleccionar y secuenciar los contenidos curriculares y para incrementar la significatividad de los materiales de aprendizaje.

Aunque menos difundidas, otras dos técnicas diseñadas con el propósito de indagar en las estructuras conceptuales de la mente son los diagramas de Venn (White, 1988; Gallástegui y Lorenzo, 1991) y las redes conceptuales (Galagovsky, 1993; Galagovsky y Ciliberti, 1994; Raviolo y Andrade, 1994; Campanario, 2004). Desde las décadas de los ochenta y los noventa, se han propuesto más estructuras conceptuales de pensamiento, entre las que destacamos las estructuras conceptuales (Otero, 1990) y los esquemas conceptuales (Otero, 1990; Saura, 1996; Domínguez, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1998a). Para dilucidar la evolución de estructuras de pensamiento, diversos autores utilizan esquemas teóricos mediante los que caracterizan el discurso de los estudiantes, y destacan las investigaciones sobre los perfiles de las líneas de discurso en la resolución de problemas conceptuales en Ciencias (Driver, Newton y Osborne, 2000) y las que, partiendo de la concepción de los argumentos como constructos sociales, utilizan el modelo de Toulmin para interpretarlos (Jiménez *et al.*, 1997).

En el estudio de las representaciones mentales se asume que un modelo mental (Johnson-Laird, 1989; Greca y Moreira, 1998) es una representación idiosincrásica, interna e implícita del conocimiento perteneciente a un ámbito o

dominio; incluye componentes perceptibles (imágenes) y expresables verbalmente (representaciones proposicionales). Algunos autores, como Greca y Moreira (1998), consideran que no es posible acceder a los modelos mentales de una persona; otros admiten que se pueden reconstruir "modelos expresos (expresados)", y que para hacer explícitos los modelos mentales hay que identificar y poner de manifiesto el conjunto de proposiciones que los constituyen. Así se generan representaciones externas y explícitas, creadas por los investigadores, con el consiguiente ruido asociado al proceso de elaboración. El concepto de modelo mental se creó en el marco de la ciencia cognitiva con la intención de interpretar y representar el pensamiento espontáneo, en un intento por resolver los problemas que planteaban o dejaban sin solución las demás aproximaciones teóricas (Gutiérrez, 2004), como la teoría de los esquemas, cuya capacidad explicativa y predictiva está limitada por las reglas que relacionan entre sí los elementos del esquema en su contexto espaciotemporal acotado (*La indagación sobre el proceso de aprendizaje. La teoría de los esquemas*, pág. 43). El término "modelo mental" se ha cargado de tal polisemia que a veces es difícil entender qué quieren decir los investigadores cuando lo utilizan (Gutiérrez, 2005), y sigue abierta la polémica sobre cuáles son los constituyentes de los modelos mentales y qué validez tiene la introducción de la lógica proposicional en ellos. Para Johnson-Laird, el pensamiento de sentido común no sigue la lógica proposicional, de manera que no tiene las limitaciones de los esquemas, porque sus reglas de inferencia permiten la predicción de futuros estados del sistema físico modelizado en una especie de simulación: la ejecución del modelo mental permite la evaluación de los modelos mentales construidos, y si no hay una correspondencia entre el comportamiento del sistema simulado y el comportamiento del sistema físico representado, el modelo mental no sería válido (Gutiérrez, 2005).

Para concretar los modelos mentales de los alumnos hemos acudido a los esquemas de conocimiento (Domínguez Castiñeiras *et al.*, 2003), esto es, de razonamiento y acción, que están inspirados en una teoría de creciente influencia en los modelos de enseñanza y aprendizaje: la teoría del aprendizaje por generación de esquemas (Rumelhart y Ortony, 1982; Rumelhart, 1989; Brincones, 1990).

La teoría de los esquemas, precursora del enfoque conexionista (Camapanario, 2004) es una aportación de la ciencia cognitiva y nació a principios de los años ochenta con el objetivo de modelizar cómo se organiza el procesamiento de la información en la memoria. Tras dos décadas de desarrollo, se ha convertido en una de las corrientes más influyentes de entre las que explican el aprendizaje sobre la base de las estructuras de conocimiento, y se han propuesto numerosos modelos de organización del conocimiento basados en algún tipo esquemático.

La definición de esquema (Rumelhart y Ortony, 1982; Rumelhart, 1989) presenta ciertas similitudes con la de marco que aporta Minsky (1986) y con la de guion propuesta por Schanck y Abelson (1987). Todos ellos describen las estructuras cognitivas como «estructuras de datos para representar los conceptos genéricos

almacenados en la memoria».

Los marcos o *frames* (Minsky, 1986) se definen en el marco de la inteligencia artificial como secuencias de acciones estereotípicas. Según Schank y Abelson (1977), los guiones o *scripts* también son secuencias de acciones estereotípicas; pero en su aproximación al procesamiento mental de la información propusieron que la mente humana organiza los conocimientos en esquemas predictivos que permiten al individuo realizar inferencias y hacer explícitos aquellos aspectos de interés que se encuentran implícitos en las situaciones y eventos de la vida cotidiana.

La teoría de los esquemas (Rumelhart y Ortony, 1982; Rumelhart, 1989) explica cómo se representa el conocimiento en la memoria humana y cómo lo utilizamos en nuestra interacción con el mundo. Al principio, esta teoría se aplicó solamente a la comprensión de textos, la representación de hechos y el reconocimiento de patrones visuales, pero en la actualidad su utilización en Didáctica de las Ciencias Experimentales abarca también la interpretación de los procesos de comprensión y control de la comprensión, y sirve de guía en la elaboración de propuestas y materiales de enseñanza (Brincones, 1990; Otero, 1990; Domínguez *et al.*, 2003).

De acuerdo con esta teoría, los "bloques" o unidades básicas del procesamiento de la información son los esquemas (*schemas*), que representan conocimientos genéricos de cualquier nivel de abstracción. Para Rumelhart, un esquema es «una representación cognoscitiva abstracta de un concepto o situación generalizada. Los esquemas contienen, como parte de su especificación, la red de interrelaciones que caracteriza a los elementos principales de la situación o concepto en cuestión» (Rumelhart, 1983, p. 294, glosario).

Tanto la comprensión como los mecanismos de recuerdo de la información (pensamiento y memoria) dependen de estas estructuras cognitivas idiosincrásicas, en las cuales se recoge, activa y procesa la información que va entrando como consecuencia de la percepción de los estímulos. Además del estímulo, en la activación de las estructuras cognitivas también influye la componente contextual: un mismo estímulo puede generar, dependiendo del contexto en el que se presente, distintos modelos de comprensión. Es posible que los esquemas activados para la comprensión de un estímulo en un contexto determinado no se activen en un contexto distinto, o que se activen con un significado diferente que no guarda relación con las estructuras que el sujeto activaría en otros contextos para la comprensión del mismo estímulo.

Los esquemas se pueden considerar conjuntos idiosincrásicos y organizados de conocimientos pertenecientes a un ámbito o dominio concreto. Forman estructuras dinámicas interrelacionadas que el individuo activa para dar respuesta a una determinada situación, suceso o acontecimiento. Estas estructuras, de creciente complejidad, no son la suma de los elementos que las constituyen, y pueden incluir

y relacionar entre sí conceptos, situaciones, sucesos y secuencias de sucesos, acciones y secuencias de acciones… Constan de conceptos y sus atributos, unidos por unas reglas que los relacionan entre sí en un contexto espaciotemporal acotado (Gutiérrez, 2004). No sólo contienen información del propio conocimiento, sino también de cómo se usa. Mediante los esquemas se pueden explicar procesos mentales complejos como la comprensión, la realización de inferencias o la elaboración de estrategias (Rumelhart y Ortony, 1982; Rumelhart, 1989). El conocimiento contenido en los esquemas determina la manera en la que se activa, categoriza y procesa la información relacionada con las situaciones problemáticas (Chi *et al.*, 1981): un individuo que dispone de esquemas más completos resuelve mejor las situaciones problemáticas relacionadas con los conocimientos de los ámbitos o dominios concretos a los que hacen referencia los esquemas. Las estructuras esquemáticas de los científicos organizan mediante múltiples relaciones las principales ideas del conocimiento científico.

Cuando un individuo aprende, crea y/o modifica sus estructuras de conocimiento. En el marco de la teoría de los esquemas se considera que el procesamiento de la información depende de la activación de los esquemas idiosincrásicos y, como consecuencia, la construcción del conocimiento también. El proceso de aprendizaje se explica en términos de la creación y modificación de los esquemas, por tres vías principales (Norman, 1985, 1987):

- por crecimiento o agregación, en la medida en que se añaden nuevos conocimientos a los esquemas ya existentes;
- por ajuste, cuando se modifican elementos de los esquemas para dar una mejor explicación a la situación planteada;
- por reestructuración, si se originan nuevos esquemas en situaciones en las que los existentes no son adecuados.

Cada una de estas vías predomina en un momento determinado del proceso de aprendizaje. Por ejemplo, el crecimiento es crucial cuando se genera un nuevo esquema, al que se añaden nuevos elementos que incorporan información sobre el ámbito correspondiente. Los procesos de ajuste y reestructuración se hacen más importantes después, cuando el individuo se enfrenta a nuevos contextos y necesita modificar algún esquema para adaptarse a la situación, o cuando la información de un esquema original resulta contradictoria o insostenible para interpretar algún aspecto del mundo. Las vías de crecimiento, ajuste y reestructuración, por las que se concibe el aprendizaje como un proceso constructivo, superan las limitaciones de las viejas teorías asociacionistas.

Esta noción de esquema como unidad molar de la organización cognitiva mediante la que se asimilan sectores de la experiencia del sujeto, es consistente con una visión constructivista del aprendizaje, siempre que consideremos que las

estructuras cognitivas (esquemáticas) son construidas por el individuo (Del Val, 1997). Si suponemos que el aprendizaje implica la generación de esquemas que se pueden utilizar y transferir (activar) en diversos contextos para elaborar explicaciones y predicciones sobre diferentes hechos y fenómenos, entonces a partir de los razonamientos argumentativos y de las acciones de un individuo se pueden determinar sus esquemas de razonamiento y acción (Domínguez Castiñeiras, Pro y García-Rodeja, 2003).

Los esquemas de razonamiento y de acción, propuestos por Domínguez Castiñeiras, Pro y García-Rodeja (2003) a partir de la teoría de los esquemas (Rumelhart y Ortony, 1982), son estructuras de conocimiento idiosincrásicas y dinámicas que permiten representar el conocimiento relacionado con el razonamiento (esquemas de razonamiento), y con la realización de acciones y secuencias de acciones (esquemas de acción). La naturaleza de los esquemas determina que pueden usarse tanto de modo declarativo como procedimental (Domínguez *et al.*, 2003), porque permiten la identificación de problemas y la elaboración y/o selección de destrezas, técnicas y estrategias encaminadas a resolverlos. Más adelante incidiremos en la idea de que los ámbitos conceptual y procedimental están estrechamente interrelacionados, desde los puntos de vista epistemológico y psicológico (Pozo, 1989), y analizaremos las aportaciones de la teoría de los esquemas a este respecto (*Componente contextual del aprendizaje*, pág. 55). Las interrelaciones entre lo conceptual y lo procedimental se pueden poner de manifiesto a través de los esquemas, que dan al saber qué y el saber cómo el valor de dos usos distintos de la misma representación. En los esquemas de razonamiento se organizan las relaciones conceptuales mediante las que los individuos elaboran interpretaciones de hechos, situaciones y fenómenos. Los esquemas de acción integran las técnicas, los procedimientos y las destrezas necesarias para llevar a cabo tareas relacionadas con el saber hacer, como la resolución de problemas.

Los esquemas de razonamiento y acción contienen información del propio conocimiento y de cómo se usa y, por ello, permiten explicar procesos mentales más relacionados con el ámbito conceptual (como la comprensión y la realización de inferencias), o más relacionados con el ámbito procedimental (como la elaboración de estrategias). Los procesos mentales ligados al ámbito conceptual pueden interpretarse utilizando los esquemas de razonamiento (Domínguez *et al.*, 1999), que representan conocimientos de tipo declarativo. Por su parte, los esquemas de acción resultan útiles para analizar los procesos mentales más relacionados con el ámbito procedimental (Domínguez *et al.*, 1998c, 1999).

Podemos postular que la estructura cognitiva se organiza en un conjunto de esquemas de conocimiento (razonamiento y acción) que constituyen redes de relaciones conceptuales referentes a un ámbito concreto. Estas relaciones suelen ser múltiples e interdependientes, y por ello las estructuras de razonamiento y acción suelen serlo también. El mecanismo de la comprensión consiste en seleccionar

esquemas cuya activación permite interpretar una determinada situación como ejemplo del conocimiento representado en ellos. Para completar el proceso de comprensión se requiere además comprobar que los esquemas permiten interpretar adecuadamente la información recibida; si este proceso se completa con éxito, se dice que el individuo comprende la situación.

Estas características de los esquemas de razonamiento y acción los convierte en herramientas útiles tanto para desarrollar e integrar conocimientos relacionados con un campo concreto, como para caracterizar la forma en la que se estructura el discurso de los alumnos respecto al razonamiento (Domínguez *et al.*, 1999) y la acción (Domínguez *et al.*, 1998-1999). Así, a partir de la teoría de los esquemas se puede diseñar una estrategia de evaluación del aprendizaje del conocimiento conceptual y procedimental (Domínguez *et al.*, 2003). Además, las propiedades de los esquemas de razonamiento y acción también hacen de ellos herramientas útiles en la realización de varias tareas de la planificación de propuestas de enseñanza, como la formulación y secuenciación de los contenidos y objetivos de aprendizaje, el diseño de actividades y la concreción de las estategias de evaluación.

En el ***Capítulo II*** se detallará el papel que juegan los esquemas de razonamiento y acción en el desarrollo de la presente investigación, como guías en las estrategias de diseño y planificación de las propuestas de enseñanza ensayadas (dentro de la *TAREA 1.- Selección, organización y secuenciación de los contenidos*, ver *Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje* pág. 380) y en las estrategias de análisis y evaluación del aprendizaje que alcanzaron los estudiantes de la muestra (*TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje*, pág. 449).

Componente social del aprendizaje

Hasta este punto hemos expuesto que el proceso de aprendizaje implica la reestructuración de los esquemas del que aprende (Norman, 1895, 1987), y que por lo general entraña un cambio conceptual (Hewson, 1981; Posner *et al.*, 1982). Pero tales cambios no deben significar un abandono de las creencias cotidianas por los conocimientos científicos. Esto sería, cuando menos, absurdo, por el simple hecho de que el concepto de "verdad" en Ciencia es discutible (Fourez, 1994). Lo que se pretende mediante la enseñanza es que los estudiantes adquieran conciencia de sus propias ideas y de las que se proponen desde la ciencia escolar, y que valoren unas y otras, reflexionando sobre la posibilidad de encontrar soluciones congruentes entre las teorías que ellos ya conocen y las que resultan de su reformulación a la luz de las relaciones que establecen con las nuevas ideas.

Dicho de otra manera, mediante la enseñanza se pretende ayudar a los alumnos a hacer evolucionar su pensamiento desde las teorías implícitas hacia las teorías explícitas compartidas (Arnay, 1997; Jiménez y Sanmartí, 1997). Las teorías

implícitas o teorías-marco (Vosniadou, 1994) no se construyen a través de procesos de reflexión y metaconocimiento, sino por asociación de ciertos acontecimientos que tienden a suceder juntos y repetirse con frecuencia. Inicialmente, estos conocimientos constituyen representaciones inestables, elaboradas *ad hoc* para cada escenario a partir de las restricciones impuestas por las teorías implicitas; pero la automatización y la condensación, mecánica o asociativa, del conocimiento acaban por generar esquemas o "paquetes de información" que funcionan como un todo (Pozo, 1996b).

Antes de que los alumnos se decanten por la aceptación de una nueva teoría, han de someterla a un proceso de validación durante el cual han de manejar distintas informaciones culturales. Para un experto es obvio que la Ciencia constituye un potente instrumento de interpretación de la realidad. Sin embargo, si queremos que el alumnado perciba la información cultural científica como una de las más útiles entre las muchas a las que puede acceder, desde la enseñanza debe potenciarse el carácter funcional del conocimiento científico.

La aceptación de las teorías científicas depende, en buena medida, de que el alumnado reconozca en los constructos teóricos y procedimentales de la Ciencia nuevas herramientas funcionales para describir e interpretar el mundo. Subyace en esto la necesidad de que perciba los contenidos de la ciencia escolar como parte de la cultura social. Es cierto que no está en la mano de los estudiantes reinventar la Ciencia; pero sí pueden incorporar a su vida aquellos contenidos científicos que se impliquen con la demanda de conocimiento planteada en la escuela (Arnay, 1997).

Para desarrollar en el entorno escolar esta concepción de la cultura científica o dimensión social de la Ciencia, se realiza el necesario proceso de transposición didáctica (Chevallard, 1985) que hace asequibles, interesantes y significativos los constructos científicos a los alumnos. Se debe crear en el aula una dinámica de trabajo con la que se construyan las teorías científicas a través de cuestiones teóricas y experimentales. También se han de fomentar las capacidades de investigación, promoviendo las prácticas discursivas asociadas a la cultura y la *praxis* científica, y socializando al alumnado con las normas de razonamiento y argumentación representativas de la Ciencia.

Tomando como referente este marco teórico, si se pretende implicar a los alumnos en el aprendizaje (Arnay, 1997), se hace evidente la necesidad de ayudarlos a hacer explícitas sus teorías implícitas. A la vez, se procurará relacionar en lo posible los contenidos de la Ciencia con las necesidades, vivencias y experiencias de los que aprenden. En este sentido, numerosas investigaciones de las últimas décadas han puesto de relieve la influencia que ejercen las prácticas discursivas en el aprendizaje de conceptos (Pontecorvo y Orsolini, 1992; Pontecorvo y Girardet, 1993; Lemke, 1997) y en el desarrollo de la capacidad de investigación (Richmond y Shriley, 1996). También parece demostrado que el trabajo en grupo es una práctica

efectiva a la hora de crear un entorno favorable a la explicitación de las teorías implícitas y a la construcción de las teorías científicas (Driver, Newton y Osborne, 2000). A la luz de estos resultados de la investigación en Didáctica de las Ciencias, cabe plantearse la necesidad de dejar entrar el lenguaje cotidiano en el aula, con la finalidad de ayudar a los alumnos a ser conscientes de sus propias teorías a través del razonamiento y la argumentación. Así los estudiantes ganan confianza en la utilización tanto de las destrezas de razonamiento y argumentación, como de las normas, estrategias y técnicas del trabajo científico. De esta manera, es posible que decidan adoptar estos elementos de la Ciencia para su uso personal (Driver, Newton y Osborne, 2000).

Sin embargo, en muchas aulas se observa que los docentes están lejos de favorecer las prácticas discursivas, el razonamiento y la argumentación. Por el contrario, formulan argumentos o simplemente afirmaciones ya estructuradas sobre el conocimiento, en espera de que los alumnos las asuman (Cross y Price, 1996). En muchos casos, este perfil de discurso persuasivo obvia datos y argumentos científicos, y se basa más en la autoridad tradicional relacionada con la posición institucional de la figura del profesor (Russell, 1983), que en la autoridad racional que otorgan el razonamiento y la argumentación. Este enfoque tradicional de la dinámica de trabajo en el aula no sólo minimiza las oportunidades de que los alumnos perciban la dimensión social de la Ciencia; también eclipsa la comprensión de la naturaleza de las Ciencias y de su gran potencial explicativo y predictivo, y distorsiona las normas que rigen el razonamiento y el trabajo científicos. Desde nuestra perspectiva, creemos que la enseñanza debe ayudar a los estudiantes a evaluar las interpretaciones científicas sobre la base de su validez, no de la autoridad de quien las expresa (Hewson y Beeth, 1995).

Para completar estas consideraciones sobre la componente social del aprendizaje, debemos clarificar qué entendemos por razonamiento y argumentación. Rescatamos de las aportaciones de Jiménez (1996a, 1998, 2003; *passim*), de Díaz (1999), de García de Cajén, Domínguez Castiñeiras y García-Rodeja (2002) y de Jiménez y Díaz (2003) distintos significados que se han asignado a estos dos términos, muy relacionados con la lógica y el lenguaje:

Por razonamiento puede entenderse una forma de comunicar que incluye una manera de escribir y hablar con uno mismo. La práctica del razonamiento científico combina la componente cognitiva de la Ciencia con los patrones organizativos que se utilizan en la expresión y en la construcción de los conocimientos científicos; estos patrones establecen la forma de poner a prueba las ideas de manera crítica. Por este motivo, el razonamiento se revela como una actividad central mediante la cual se presentan razones en apoyo de una conclusión (Toulmin, 1958; Toulmin, Rieke y Janik, 1979). De ahí la importancia de aprender a hablar Ciencia (Lemke, 1997). En la actualidad la argumentación, entendida como el proceso de justificación de conclusiones sobre la base de pruebas y mediante su

coordinación con los datos disponibles, se considera como parte integral de la enseñanza de las ciencias (Jiménez Aleixandre y Erduran, 2008): estimula el desarrollo de las competencias comunicativas (especialmente el pensamiento crítico) y de los procesos cognitivos y metacognitivos de orden superior; contribuye a la enculturación en las prácticas científicas y los criterios epistémicos para la evaluación del conocimiento; y ayuda a los estudiantes a hablar y escribir científicamente, a la vez que sirve de soporte a los procesos de razonamiento, en particular a la elección de teorías o posiciones basadas en criterios racionales.

Según Driver, Newton y Osborne (2000), argumentar consiste en aportar una razón a favor o en contra de una proposición o línea de acción. Para estos autores, la actividad argumentativa se sitúa en unos marcos sociales específicos que configuran su perspectiva de situación. Desde este punto de vista, la argumentación puede considerarse una actividad individual, a través de la reflexión y la escritura, o una actividad social que tiene lugar en el seno de un grupo de individuos.

Esta definición de la argumentación parece la base de una interpretación retórica, según D. Kuhn (1993), o didáctica, para Driver, Newton y Osborne (2000): mediante la actividad argumentativa se pretende convencer a la audiencia de la solidez de los argumentos expuestos. Se reconoce así que la argumentación tiene dos componentes, la justificación sobre la base de pruebas y la persuasión (Jiménez Aleixandre y Erduran, 2008; Jiménez Aleixandre y Gallástegui Otero, 2011).

Driver y Newton (2000) proponen el concepto de argumentación dialógica o voz múltiple (Mortimer y Scott, 2003; Jiménez Aleixandre y Reigosa, 2005) para referirse a la actividad argumentativa por medio de la cual se examinan distintas perspectivas para consensuar qué afirmaciones sobre el conocimiento son aceptables, o qué líneas de acción se decide emprender. Este tipo de argumentación, que puede producirse en el seno de un grupo, también puede ser realizada por un único individuo, cuando éste evalúa comparativamente los distintos argumentos de que dispone, al aplicarlos a la interpretación de situaciones concretas.

Un ejemplo muy común de argumentación unilateral (esto es, realizada por un interlocutor ante una audiencia) es el desarrollo de una explicación científica por parte de un profesor que pretende que sus alumnos acepten ésta como razonable. Si el docente ordena los datos y construye los argumentos sin participación alguna de los estudiantes, está generando una situación argumentativa unilateral. Con esta perspectiva de la argumentación se relega al alumnado al papel de una audiencia pasiva que acepta o rechaza argumentos sin desarrollar las destrezas de argumentación que forman parte del quehacer científico, y se obstaculiza el desarrollo de la visión de la Ciencia como una construcción social.

Sin embargo, si se proporcionan oportunidades al alumnado para abordar problemas en un contexto de grupo o de debate, en el que se genera una situación argumentativa de voz múltiple, los estudiantes pueden identificar y evaluar

diferentes argumentos para llegar a un acuerdo científicamente fundamentado sobre la resolución del problema (García de Cajén, Domínguez Castiñeiras y García-Rodeja Fernández, 2002).

Cuando un alumno habla Ciencia mediante la argumentación social (Pontecorvo y Girardet, 1993) en un contexto como el aula, en el que recibe la influencia de sus compañeros (Vergnaud, 1997), podemos considerar que se abre paso desde su propio proceso de razonamiento (interno, individual e idiosincrásico) a un proceso de razonamiento colectivo o compartido. En este sentido, D. Kuhn (1993) identifica la discusión (del inglés *argument*) con la argumentación. Aquí el docente juega un importante papel como regulador de la argumentación social, porque concreta su intervención en acciones encaminadas a ayudar a los estudiantes a identificar y evaluar los argumentos propios de cada uno, los de los compañeros y los propuestos desde la ciencia escolar. Para valorar la calidad de la argumentación, ha de tenerse en cuenta que un buen argumento se apoya en pruebas para sustentar las conclusiones propias y considera las hipótesis alternativas al evaluar un dato o prueba (Jiménez Aleixandre y Gallástegui Otero, 2011). En apartados posteriores (*El nuevo modelo de profesorado*, pág. 63; *Fundamentos de la metodología*, pág. 290) incidiremos sobre este tipo de acciones docentes que convierten al profesor en un verdadero guía del proceso de construcción del conocimiento. Por ahora solamente declaramos la necesidad de organizar las aulas de Ciencias de manera que los alumnos tengan oportunidad de practicar las destrezas cognitivas de razonamiento y argumentación tanto a nivel individual como colectivo: con la ayuda del profesor, pueden desarrollar estas destrezas cognitivas características del trabajo científico e integrarlas como herramientas para el aprendizaje de hechos, conceptos y modelos útiles para describir e interpretar la realidad.

Componente contextual del aprendizaje

Las destrezas cognitivas de razonamiento y argumentación se desarrollan siempre en un contexto determinado, que influye de manera determinante en la construcción de los argumentos mediante los que se llega a un acuerdo sobre las proposiciones aceptables y las líneas de acción a seguir.

Retomamos en este punto la contribución de Driver, Newton y Osborne (2000): argumentar implica considerar una serie de posiciones alternativas, elaborar argumentos para cada una de ellas y valorar comparativamente los argumentos al aplicarlos a la resolución del problema objeto de estudio.

Para ofrecer respuesta a un problema, los estudiantes han de buscar una vía entre sus creencias personales, las creencias de los otros individuos implicados en el contexto en que se trabaja, y la tarea de resolución del problema. Alcanzar esta vía de compromiso requiere considerar posiciones alternativas sobre las distintas afirmaciones, a través de los argumentos construidos para valorarlas. Así, los que

aprenden están trabajando reflexivamente sobre la naturaleza de sus argumentos.

He aquí la integración de las tres componentes del aprendizaje: la naturaleza de los argumentos que un alumno utiliza, en el contexto del aula de Ciencias, está condicionada por el contenido del problema planteado, por la estructura cognitiva del argumentador y por el funcionamiento del grupo de trabajo, que a su vez depende de una serie de factores sociales. Entre ellos, el estilo del líder del grupo (Díaz, 1999) es determinante en el progreso del grupo de trabajo y, por tanto, en el desarrollo de la argumentación (Richmond y Shriley, 1996).

Al integrar las tres componentes del aprendizaje, podemos establecer una perspectiva más completa de lo que entendemos por conocimiento, más allá de un conjunto de constructos conceptuales. En la línea de Anderson (1983), podemos diferenciar dos tipos fundamentales de conocimiento: el declarativo (relacionado con el saber decir) y el procedimental (relacionado con el saber hacer). La investigación educativa ha demostrado la diferente naturaleza de ambos tipos de conocimiento, y con ello ha dotado de significado psicológico a la divergencia entre lo que podemos decir y lo que podemos hacer. No solamente se trata de dos categorías distintas de conocimiento, sino que, en muchos casos, su adquisición se produce por vías diferentes (Pozo y Gómez Crespo, 1998). El conocimiento declarativo, fácilmente verbalizable y en general consciente, suele adquirirse por exposición verbal. Por el contrario, el conocimiento procedimental se adquiere más fácilmente a través de la acción y, como consecuencia de su carácter difícilmente verbalizable, habitualmente se ejecuta de modo inconsciente.

Esta categorización del conocimiento en sus aspectos declarativo y procedimental tiene una implicación directa sobre la *praxis* de la enseñanza de las Ciencias: si se concibe el aprendizaje como un proceso en el que se integran lo conceptual y lo procedimental, no tiene sentido que la teoría deba preceder siempre a la práctica, porque desarrollar el conocimiento no se trata de «llevar a la práctica una teoría» (Gil Pérez *et al.*, 1990). Sobre este punto volveremos más adelante (*Fundamentos de la metodología*, pág. 290).

Los dos tipos de conocimiento se adquieren y aplican por procesos diferentes y hasta cierto punto independientes (Pozo, 1989, 1996), y de hecho se comprueba que en muchos casos ni siquiera se produce una coincidencia o convergencia entre ambos. Demostrado esto, desde la psicología cognitiva puede considerarse falsado el viejo principio de que las dificultades en el saber hacer se deben a la incapacidad de poner en acción lo que se sabe decir. A modo de ejemplo, destacan las aportaciones de Pozo y Gómez Crespo (1998) sobre las dificultades que suelen mostrar los estudiantes cuando intentan convertir sus conocimientos científicos descriptivos y conceptuales en acciones eficaces, o al definir o describir acciones que son perfectamente capaces de ejecutar.

Pero los marcos conceptual y procedimental no son independientes entre sí.

Todo lo contrario: tanto desde un punto de vista epistemológico como psicológico, están estrechamente interrelacionados (Pozo, 1989), y esto se pone de manifiesto visualmente utilizando la técnica de la V de Gowin (Novak y Gowin, 1988), que, por otra parte, también es útil para explorar las ideas de los estudiantes y para orientar la instrucción hacia la consecución de un aprendizaje significativo, además de como recurso didáctico en el diseño de trabajos prácticos (Izquierdo, 1994) y como técnica de análisis de materiales curriculares (Bascones, 1989; Novak, 1991). Sin embargo, y a pesar de su utilidad, esta técnica ha tenido menor difusión y desarrollo que los mapas conceptuales; parece que su escaso impacto social tiene mucho que ver con la complejidad de su elaboración.

En lo que respecta a la relación entre el conocimiento declarativo y el procedimental, nos interesan las aportaciones basadas en la teoría de los esquemas (Rumelhart y Ortony, 1982; Rumelhart, 1989), porque en esta investigación hemos utilizado esquemas de razonamiento y acción como instrumentos en la planificación de las propuestas de enseñanza ensayadas y en la evaluación del aprendizaje que alcanzaron los alumnos en relación con dichas propuestas. A continuación se exponen las razones en las que nos basamos para adoptar esta decisión:

Los esquemas de razonamiento y acción se definen como estructuras de conocimiento idiosincrásicas y dinámicas en las que se integran razonamiento y acción, y que se pueden activar para transferir el conocimiento a diversas situaciones (Domínguez Castiñeiras, Pro y García-Rodeja, 2003). Son estructuras de organización y representación del conocimiento declarativo ("el saber qué") y procedimental ("el saber cómo"). Esta posibilidad integradora surge de la propia naturaleza del esquema, que incluye todo tipo de conocimiento en torno al constructo que en él se representa. La organización de los esquemas se puede definir como jerárquica en el sentido de que cada esquema se compone de otros constituyentes de nivel inferior: un esquema puede contener otros esquemas, o solapar con otros esquemas. A su vez, estos esquemas de nivel inferior al dominante (subesquemas) tienen estructuras complejas cuya representación en la memoria se realiza por medio de etiquetas o nombres, no de su estructura completa. La estructura de los subesquemas está condicionada por las relaciones que establecen con otros subesquemas y con los constituyentes de nivel inferior, las variables, que pueden adoptar distintas funciones dentro del esquema dependiendo del valor que les asigne el individuo para explicar la situación estímulo.

Las reglas que relacionan entre sí los elementos de los esquemas son proposiciones lógicas, no sujetas a contingencias espaciotemporales (Gutiérrez, 2004), así que las explicaciones y predicciones que se pueden realizar a partir de un esquema presentan restricciones impuestas por las reglas lógicas. Por este motivo, es difícil que las formas de pensamiento cotidianas, no regidas por la lógica proposicional, se puedan representar en esquemas de conocimiento; al intentar crear relaciones propias del pensamiento cotidiano entre los elementos de estas formas de

pensamiento, se generan esquemas muy fragmentarios o incoherentes.

Los esquemas carecen de un tamaño o número de elementos fijo, y son estructuras flexibles, en tanto en cuanto se puede acceder a sus elementos por varios canales. Por su carácter jerárquico, todo esquema es a su vez un subesquema de otro concepto más general, y su activación puede producirse tanto de arriba abajo, desde sus subesquemas, como de abajo arriba, por su relación con esquemas superiores que determinan su sentido. El procesamiento de arriba abajo se considera guiado por el conocimiento conceptual o procedimental, porque el individuo recorre el esquema en busca de la información adecuada a los esquemas superiores que ha activado; por ejemplo, si pretende asignar algún valor por defecto a alguna variable. Por el contrario, el procesamiento de abajo arriba está guiado por los datos, por la información que recibe el individuo y que debe encajar en sus esquemas de conocimiento. En el proceso de resolución de un problema, un experto empieza su actuación extrayendo la información del planteamiento de la situación problemática. Una vez activadas las relaciones inferiores del esquema, sigue un procesamiento de abajo arriba, relacionando la información con los conocimientos más generales. A continuación realiza el procesamiento inverso, de arriba abajo, guiándose por sus conocimientos para encontrar la información que le permite dar respuesta al problema planteado.

En la red de relaciones que se establece entre los elementos de los esquemas, se pueden asignar a un mismo elemento múltiples relaciones, y diferentes valores dependiendo del significado que aporta la situación estímulo. Gracias a esta propiedad de los esquemas, se puede atribuir a cualquier constructo un significado complejo y lleno de matices, porque sobre él se activa un entramado de relaciones que abarcan nociones muy dispares, como por ejemplo conceptos pertenecientes a distintos dominios de representación del conocimiento. La flexibilidad en la asignación de valores hace que sea posible representar, para un mismo elemento, distintos significados según el contexto. Como ejemplo, tomemos el concepto de entropía: en diferentes contextos, puede tener asignado el significado de "magnitud que expresa el calor transferido de manera reversible a una temperatura dada" (ésta es la definición de Clausius), o el de "magnitud que cuantifica el desorden termodinámico", o el de "magnitud que proporciona la medida de la probabilidad de un microestado energético" (definición de Boltzmann), o significados alternativos, no coincidentes con los de la ciencia escolar, como "magnitud que indica la distribución espacial de las partículas en un sistema", "magnitud que mide la cantidad de energía que se transfiere al medio", etc. Aquí tenemos varios de los papeles que puede cumplir en un esquema el elemento entropía.

Ya hemos explicado cómo se interpreta el mecanismo de la comprensión desde la teoría de los esquemas: comprender consiste en seleccionar esquemas cuya activación permite interpretar una determinada situación (*Componente cognitiva del aprendizaje*, pág. 35). Además, los esquemas sirven como instrumentos para realizar

inferencias sobre aspectos implícitos, nuevos o no perceptibles. Ésta es la función del esquema como predictor de estímulos no observados, y se debe a la articulación de los elementos subesquemas y variables, que sirven como vehículo para establecer inferencias sobre aspectos no observables a partir de relaciones probables sobre los aspectos observables. Es decir, a partir de relaciones contenidas en el esquema pueden establecerse inferencias sobre relaciones ausentes:

Los esquemas suelen contener una serie de restricciones con respecto a los posibles valores de los subesquemas y las variables, lo que delimita su significado. La asignación de valores puede realizarse a partir de la información ambiental o de la almacenada en la memoria, y en caso de que se carezca de información suficiente sobre una actualización concreta del esquema, existe la posibilidad de generar en él asignaciones ausentes, activando valores por defecto para los constituyentes (subesquemas o variables). Estos valores por defecto se determinan mediante procesos inferenciales que pueden tener en cuenta la relación entre los elementos del esquema. Así, aunque la información esté implícita al esquema y permanezca elíptica por el estímulo desencadenante de la activación, el individuo puede asignar (o no) un valor al subesquema o la variable ausente. Aunque la activación de los valores prototípicos o más probables de un elemento puede conducir a errores en la interpretación de una situación concreta, al menos permite la activación de los esquemas ante valores ausentes. La activación de estas relaciones no está garantizada por cualquier situación estímulo en la que se active un elemento concreto, aunque los detalles supuestos en cada caso sí nos permiten asignarle un valor por defecto (o lo que es lo mismo, realizar una asignación ausente sobre él). Por ejemplo, en el esquema de razonamiento referencial ***ER1*** (anexo, ***Volumen*** $\boldsymbol{B_2}$), ***estado de agregación*** es un subesquema al que se pueden asignar los valores *estado condensado* o *estado gaseoso*. Cuando se habla de que un sistema formado por una sustancia química aumenta de volumen como consecuencia de un cambio de estado, podemos considerar que el valor por defecto asignable a ***estado de agregación*** es *estado gaseoso*, aun cuando no se haga explícita la correspondiente relación subesquema-variable que figura en ***ER1***.

Es importante destacar que estas propiedades no se restringen a los esquemas de razonamiento, sino que son comunes tanto a éstos como a los de acción, en los que se representa el conocimiento relacionado con las acciones y sus secuencias, incluidas las secuencias complejas de acciones coordinadas que requieren una interpretación elaborada de los procesos que se efectúan en su realización. En los esquemas de acción no figuran las acciones primitivas, que son automáticas, se refieren a contextos muy específicos y son, por lo tanto, transferibles a otros contextos sin prestar atención a sus constituyentes. En (Domínguez Castiñeiras, 2000) encontramos un claro ejemplo de acción primitiva: cuando a los alumnos se les pregunta cómo pondrían a cero un termómetro de laboratorio, algunos sujetan el termómetro por la parte opuesta al bulbo, lo agitan fuertemente y

se sorprenden al comprobar que su acción no tiene éxito.

Por lo general, la activación de los esquemas de acción demanda a su vez la activación de esquemas de razonamiento que contienen variables relacionadas con la acción, porque la coordinación de muchas acciones requiere la interpretación de determinadas percepciones.

La posibilidad de activar esquemas de acción que hacen referencia a las mismas dimensiones, pero están situados en diferentes niveles de abstracción, permite analizar las relaciones que existen entre los planes (o esquemas de acción muy abstractos) y las ejecuciones de los planes, cuyo nivel de abstracción es menor, aunque no existe demasiada discontinuidad entre ambos. Un ejemplo de plan sería la secuencia de acciones coordinadas que se necesita para realizar una representación gráfica, y la ejecución del plan está constituida por el conjunto de las acciones mediante las que se representa gráficamente la función objetivo. El esquema de acción referencial ***EA3*** (anexo, ***Volumen B$_2$***) recoge la estructura de acción en la que se integran los conceptos, técnicas y destrezas que se utilizan para representar gráficamente los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos.

Teniendo en cuenta el propósito de esta Tesis, nos interesa averiguar qué saben los alumnos de la muestra sobre ciertos contenidos conceptuales y procedimentales relacionados con la Termoquímica y la Termodinámica Química, cómo articulan sus conocimientos, cómo los utilizan y cómo y por qué los hacen evolucionar cuando describen e interpretan hechos y fenómenos.

Por contener información del conocimiento y de cómo se usa, los esquemas de razonamiento y acción constituyen instrumentos útiles para desarrollar e integrar conocimientos relacionados con un campo concreto. Dado que pretendemos crear una representación explícita, precisa, completa, estable y consistente del conocimiento de la ciencia escolar, hemos elaborado los esquemas de razonamiento y acción que denominamos referenciales de la ciencia escolar (Domínguez *et al.*, 2003). En ellos se ponen de manifiesto los conjuntos de proposiciones compartidas que articulan los conocimientos deseables, objeto de aprendizaje en las propuestas ensayadas (*Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje*, pág. 380).

Las propiedades de los esquemas de razonamiento y acción también ofrecen la posibilidad de caracterizar la forma en la que se estructura el conocimiento conceptual y procedimental de los estudiantes, a partir de los razonamientos argumentativos y las acciones que están presentes en su discurso (Domínguez Castiñeiras *et al.*, 2003). Sobre la base de los esquemas referenciales elaborados en la planificación de las propuestas, y partiendo de los argumentos y acciones que realizaron los alumnos en sus respuestas a las actividades y pruebas planteadas, se exploró qué conocimientos tenían en distintos momentos de la intervención, y la

información obtenida se representó en los esquemas de razonamiento y acción que denominamos idiosincrásicos, representativos de cada individuo en un momento determinado. Para evaluar el aprendizaje producido y relacionarlo con las propuestas de enseñanza ensayadas (*Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento*, pág. 456), se analizó la evolución de estos esquemas idiosincrásicos, implícitos, hacia los referenciales de la ciencia escolar, que son explícitos y elaborados por los investigadores. Así se verifica qué inferencias y acciones realizaron los estudiantes en el proceso de aprendizaje. Pero se plantean muchos interrogantes al respecto (Domínguez, 2000): ¿Cómo conseguir que los esquemas sean independientes del contexto de activación? ¿Cómo determinar qué esquemas se construyen como resultado del aprendizaje? ¿Cómo estudiar la evolución y la estabilidad de los esquemas en el tiempo?

Dado que los esquemas que activa un individuo para dar respuesta a una situación dependen del contenido y del contexto concreto, no es tan simple identificar cuáles tiene un alumno en un momento dado, porque actividades o pruebas diferentes pueden promover la activación de esquemas distintos. Este problema se resuelve dimensionando el conocimiento de la ciencia escolar en los esquemas de razonamiento y acción referenciales, porque entonces se identifican y analizan más fácilmente las múltiples relaciones que hay entre los constructos científicos objeto de aprendizaje. En el apartado *Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje* (pág. 380) se recoge el proceso que se siguió en la elaboración de los esquemas de razonamiento y acción referenciales de esta investigación.

I.3.3. Implicaciones para la enseñanza de las Ciencias

A partir de la revisión de la literatura que hemos realizado hasta este punto, se desarrollan las principales implicaciones que ayudan a integrar en el trabajo de aula las tres componentes del aprendizaje. Para ayudar a los alumnos a construir un aprendizaje significativo de los conceptos, modelos y procedimientos de la ciencia escolar, junto con actitudes y valores acordes con una imagen actualizada de la Ciencia y de la actividad científica, hay que prestar atención a tres aspectos fundamentales: el nuevo modelo de profesorado, las secuencias de enseñanza y los materiales de aprendizaje. Antes de dedicar un apartado de este apartado a cada uno de estos aspectos, resumimos las ideas clave de cualquier visión constructivista (Driver y Bell, 1986; Ollerenshaw y Ritchie, 1997):

- Importa lo que está en la mente del que aprende: El proceso de aprendizaje depende no sólo de los medios empleados para transmitir la información que integra el conocimiento deseable, sino también del conocimiento previo, las actitudes y las metas del alumno.
- Cada individuo construye su propio significado: El proceso de aprendizaje

es idiosincrásico, porque implica una construcción de conocimientos a través de las experiencias de la persona, que interacciona con el mundo mediante sus sentidos.

- Algunos significados son compartidos, incluso por individuos con experiencias vitales muy diferentes: Los estudiantes de muy diferentes países y culturas suelen mantener muchas ideas similares sobre los fenómenos naturales.
- Construir un determinado significado no implica aceptarlo: Los significados, una vez construidos, pueden ser aceptados o rechazados por el individuo.
- La construcción de significados es un proceso dinámico y continuo, mediante el cual se reorganizan y amplían las estructuras de conocimiento: Relacionar el nuevo conocimiento con el ya adquirido supone la generación, comprobación y reestructuración de ideas e hipótesis. Aprender incluye añadir nuevos conocimientos a las estructuras ya existentes, y además reorganizar éstas.
- El individuo tiene la responsabilidad final sobre su propio aprendizaje, puesto que lo desarrolla y regula de forma activa: El aprendizaje es un proceso en el que el alumno fija sus propias metas y controla su consecución.

La línea de investigación en la que se encuadra esta Tesis (*Antecedentes de la investigación: el proyecto AcAb y su continuación en la actualidad*, pág. 4) tiene por objetivo desentrañar las relaciones entre los procesos de aprendizaje y los modelos de enseñanza. Para ello, se exploran las posibilidades que ofrecen los distintos planteamientos de orientación constructivista, y se evalúa en qué medida pueden ser útiles para ayudar a los alumnos a alcanzar las que consideramos metas educativas básicas de la enseñanza de las Ciencias (Domínguez Castiñeiras, 2000; Domínguez Castiñeiras, 2001; Domínguez Castiñeiras, Pro y García-Rodeja, 2003).

A continuación se revisan las principales contribuciones constructivistas a la elaboración de modelos de enseñanza, realizados desde los planteamientos más valorados por la comunidad investigadora en Didáctica de las Ciencias. Esta revisión se organiza en tres apartados:

El primero se dedica a analizar el nuevo modelo de profesor que se propugna desde la investigación en Didáctica de las Ciencias y desde las recientes reformas educativas en España y Europa (*El nuevo modelo de profesorado*, pág. 63). En el segundo apartado se analizan las secuencias de enseñanza más representativas en el campo de la Didáctica de las Ciencias en los últimos años (*Secuencias de enseñanza*, pág. 66). Por último, se recogen los materiales de aprendizaje propuestos desde investigaciones recientes sobre la resolución de problemas en Ciencias (*Materiales de aprendizaje*, pág. 84).

I.3.3.1. El nuevo modelo de profesorado

Al comenzar la Memoria (*Origen de la investigación*, pág. 3) avanzábamos algunas características que reúne el nuevo modelo de profesor propuesto desde la investigación en Didáctica de las Ciencias y las recientes reformas educativas en España y Europa. Se trata de un profesional dinámico, activo, reflexivo, que planifica y evalúa su propia actividad docente y la compagina con la actividad científica (Domínguez *et al.*, 1990; Pro, 1990; Mellado, 1996, 1998).

Los avances en la investigación han modificado sustancialmente la concepción del profesorado, desde los antiguos paradigmas como los de la racionalidad técnica, hasta los modernos, compatibles con el constructivismo. Consecuentemente con estos cambios de paradigma, el docente ha dejado de ser un técnico que aplicaba los conocimientos teóricos, para convertirse en un profesional con concepciones, decisiones y juicios propios (Mellado y González, 2000). También desde las administraciones educativas de los distintos países se está trabajando para alcanzar un consenso sobre el perfil del nuevo docente, que debe ser capaz de responder a los nuevos retos de la compleja sociedad en la que vivimos, inmersa en un contexto cultural e histórico en rápida evolución (VV.AA., 2009a). Las primeras reformas del siglo XXI otorgan una gran importancia a la labor docente en la consecución de los objetivos que se han marcado en la transformación del sistema educativo, tanto a nivel nacional como europeo. En España, la LOE reconoce el papel del profesor como eje central del funcionamiento de los centros educativos (MEC, 2006a). Según este texto, cualquier objetivo que se pretenda alcanzar en materia educativa depende directamente de las funciones docentes y del compromiso de los profesionales:

«La actividad de los centros docentes recae, en última instancia, en el profesorado que en ellos trabaja. Conseguir que todos los jóvenes desarrollen al máximo sus capacidades, en un marco de calidad y equidad, convertir los objetivos generales en logros concretos, adaptar el currículo y la acción educativa a las circunstancias específicas en que los centros se desenvuelven, conseguir que los padres y las madres se impliquen en la educación de sus hijos, no es posible sin un profesorado comprometido en su tarea.» (…) «Y todo ello resulta imposible sin el necesario reconocimiento social de la función que los profesores desempeñan y de la tarea que desarrollan. »

El nuevo *curriculum* abierto y flexible que se propone desde la nueva reforma educativa apela a la responsabilidad del profesorado en el proceso de enseñanza y aprendizaje, y hace hincapié en la necesidad de que éste ejerza una mayor autonomía en sus decisiones sobre su intervención didáctica y su actividad investigadora. Ya hemos declarado nuestro convencimiento sobre la necesidad de que el profesorado adopte decisiones didácticamente fundamentadas para dar respuesta a ciertos interrogantes que se derivan de las finalidades de la ciencia

escolar (*Figura 4*, pág. 26): ¿qué conocimientos se pretende construir, qué destrezas es conveniente promover, qué actitudes y valores se desea fomentar si se pretende que los alumnos desarrollen un aprendizaje significativo de la ciencia escolar?

La labor del nuevo docente en el proceso de enseñanza es la de mediador y regulador en la construcción del conocimiento que desarrollan los estudiantes (Osborne y Wittrock, 1983; Bertelle *et al.*, 2006). Esta concepción se aleja de la tradicional, que le encargaba transmitir los contenidos y evaluar periódicamente qué recordaban los alumnos. Los avances de la investigación sobre el funcionamiento de los procesos cognitivos y el desarrollo de los modelos de procesamiento de la información han contribuido al cambio de perspectiva sobre las estrategias de dirección de aula: frente al aprendizaje fundamentalmente repetitivo, poco o nada significativo y apenas funcional que promovían las concepciones tradicionales, se pretende que los nuevos docentes utilicen estrategias de dirección de aula que promuevan un aprendizaje significativo y útil de la ciencia escolar.

Este papel refleja la teoría de la enseñanza como una actuación asistida (Tharp y Gallimore, 1991 en Ollerenshaw y Ritchie, 1997). En ella, el aprendizaje se concibe como una secuencia de distintas zonas de desarrollo próximo, o funciones en estado embrionario que el individuo puede hacer progresar recurriendo al desarrollo de nuevas capacidades o con la ayuda de otros individuos (Vygotsky, 1979; Roth, 1995; Ollerenshaw y Ritchie, 1997; *El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27). El profesor reflexivo asume la responsabilidad de ajustar las demandas de las sucesivas ZDP de los estudiantes al desarrollo del conocimiento. Para lograrlo, ha de ser capaz de crear entornos de aprendizaje en los que el alumnado trabaje siendo consciente de qué debe aprender, cómo, por qué y para qué. Esta labor requiere que el profesor conozca cómo se desarrollan la construcción de significados y las estrategias de pensamiento y de comunicación, y que se familiarice con las acciones que pueden favorecer el aprendizaje.

En el ámbito investigador, el docente analiza la realidad del contexto escolar y estudia la naturaleza y el desarrollo de los procesos de enseñanza y aprendizaje. Reflexiona sobre su práctica profesional, y diseña, desarrolla y evalúa propuestas didácticas, materiales de enseñanza… con el objetivo de comprender y mejorar sus estrategias de dirección de aula (Shón, 1993) y dar respuesta a las necesidades e inquietudes de la sociedad actual. En España, el artículo 91 de la LOE (*capítulo I, título III*) expresa que esta función de investigación, experimentación y mejora continua de los procesos de enseñanza es una de las funciones básicas del profesorado (MEC, 2006a).

Consecuentemente con esta nueva concepción de la labor docente, desde las administraciones educativas se propone una renovación de la formación inicial del profesorado de todos los niveles de enseñanza. Ahora parece superada la idea de que se debe transmitir a los alumnos unos conocimientos de cantidad y complejidad

crecientes a medida que se incrementa el nivel de enseñanza, lo que infundía un cierto optimismo en el viejo modelo de formación del profesorado (Domínguez J. M., García-Rodeja, Jiménez y Lorenzo, 1990; Pro, 1990).

En el caso de la enseñanza secundaria, que aquí nos ocupa, nos encontramos en pleno proceso de implantación del nuevo programa europeo de formación inicial del profesorado, encaminado a subsanar las insuficiencias que revelaba el anterior modelo sumativo de formación, fiel reflejo del lema "para enseñar basta con saber la asignatura". El modelo sumativo, ahora en extinción, mostraba grandes lagunas en la formación didáctica y psicopedagógica de los futuros docentes, quienes, por otra parte, no veían en el CAP más que un trámite necesario para obtener un título que les permitiera presentarse a las oposiciones a la función pública docente (Martínez, García y Mondelo, 1993). Pero el defecto más grave era que, al mantener en compartimentos estancos la teoría y la práctica docente, se obtenía una escasa o nula integración de una en la otra (Mellado, 1996, 1998, 2000).

El nuevo enfoque de la labor docente es consecuente con la concepción de la enseñanza como un proceso que incluye un conjunto de destrezas mediante las que se integran en la práctica una serie de compromisos teóricos (Saura, 1996). La formación inicial y permanente del profesorado debe facilitar a los docentes una amplia perspectiva de los conocimientos concretos que deben poseer. Estos conocimientos no se limitan a las disciplinas que impartirá, sino que abarcan también el proceso de aprendizaje y las metodologías consideradas óptimas para los distintos niveles educativos y los ambientes de la realidad escolar en la que el docente desarrollará su labor profesional. Hoy se considera indiscutible la necesidad de que la formación inicial incluya, junto con los contenidos culturales, psicopedagógicos y didácticos generales, los contenidos didácticos del área de conocimiento que será objeto de enseñanza. De ello se encargan las Didácticas de las disciplinas, como la Didáctica de las Ciencias. En palabras de Viennot (1989), la Didáctica de las Ciencias es el campo que, teniendo como objetivo la investigación en la enseñanza, estudia los aspectos relacionados con los contenidos de Ciencias: conceptos, procedimientos y actitudes.

Podemos condensar todas estas reflexiones sobre las funciones del nuevo docente, las finalidades de la ciencia escolar y las necesidades de los estudiantes en un diagrama como el de la *Figura 5* (página siguiente), en el que se pone de manifiesto el papel que juega la labor investigadora del profesor en el diseño y la puesta en práctica de un plan de acción docente que tenga en cuenta las características del contexto en que se desarrolla su actividad. El que enseña, en su labor de facilitador del aprendizaje, determina los conocimientos de los alumnos y, a partir de la determinación de las estructuras de razonamiento y de acción, concreta el plan docente, que ha de cubrir las necesidades y expectativas de los alumnos, y ayudarlos a comprometerse con la evolución de sus conocimientos y con las destrezas de conocer, razonar y argumentar.

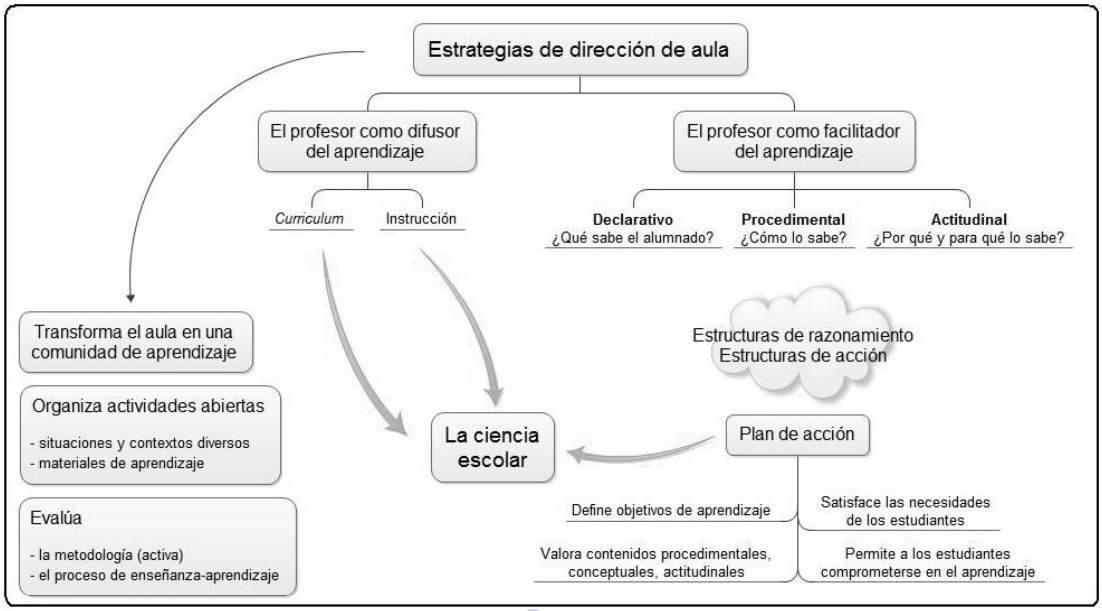


Figura 5: papel de la investigación en el diseño y elaboración de estrategias de dirección de aula y planes de acción docente

La conjunción de la actividad docente e investigadora capacita al nuevo profesor para elaborar un plan de acción acorde con las ideas que emanan de la investigación en Didáctica de las Ciencias y de las nuevas reformas educativas; pero en todo caso su labor se hace más asequible, interesante y fructífera si se le facilitan actividades estructuradas y operativas sobre las que trabajar. No hemos de olvidar, además, que la difusión de propuestas de enseñanza desde la comunidad investigadora en Didáctica de las Ciencias potencia la sinergia entre la realidad de aula y la acción investigadora a todos los niveles de enseñanza.

A la hora de diseñar nuevas propuestas didácticas, se han de seleccionar las secuencias de enseñanza que se pretenden desarrollar, así como los materiales de aprendizaje que servirán de vehículo para trabajar los contenidos propuestos. Estos aspectos se describen y analizan en los dos apartados siguientes, dedicados, respectivamente, a las secuencias de enseñanza (a continuación) y a los materiales de aprendizaje más representativos en la Didáctica de las Ciencias Experimentales (*Materiales de aprendizaje*, pág. 84).

I.3.3.2. Secuencias de enseñanza

Partiendo de la perspectiva constructivista del aprendizaje, se pueden adoptar diversas disposiciones didácticamente fundamentadas que conducen a la elaboración de secuencias de enseñanza. Entendemos por secuencia de enseñanza un conjunto de decisiones sobre la organización de las actividades que se van a realizar y sobre los materiales que se van a utilizar con el propósito de ayudar a los estudiantes a conseguir un buen aprendizaje, esto es, un aprendizaje significativo, según Ausubel *et al.* (1983). No debe olvidarse que los conocimientos iniciales de los estudiantes adquieren una relevancia especial. En palabras de Ausubel:

«Si yo tuviera que reducir toda la psicología educativa a un solo principio, enunciaría este: averígüese lo que el alumno ya sabe y enséñese consecuentemente.»

Como se ha indicado ya, las secuencias de enseñanza y otros muchos aspectos didácticos se ven condicionados por las distintas concepciones sobre la Ciencia y sobre su aprendizaje. En esta exposición, partimos de los planteamientos teóricos expuestos en los anteriores apartados: el realismo no representativo (*Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar*, pág. 15) y el constructivismo social (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27). Desde esta perspectiva, resumimos por orden cronológico tres secuencias de enseñanza que han tenido una gran aceptación en Didáctica de las Ciencias:

La secuencia constructivista de Driver y Oldham (1986) consta de seis fases: orientación, elicitación de ideas, reestructuración de ideas, evaluación de ideas en situaciones próximas, aplicación de ideas y revisión de datos. Dos años más tarde se publicó la secuencia de Hodson (1988), de estructura parecida a la anterior, que deriva de la concepción del aprendizaje como cambio conceptual. En esta secuencia se observan tres fases: una de explicitación de las propias ideas, otra de exploración de las implicaciones de las ideas iniciales, y por último la fase de introducción de las nuevas ideas. Por su parte, Cosgrove y Osborne (1991) proponen una secuencia de enseñanza similar, enfocada desde el marco del modelo generativo del aprendizaje de Osborne y Wittrock (1983). Consta de cuatro fases: preliminar, de enfoque, de cambio y de aplicación.

La secuencia constructivista que nosotros hemos seguido para diseñar, planificar y desarrollar las unidades didácticas *Termoquímica* y *Termodinámica Química* es la propuesta por Ollerenshaw y Ritchie (1997), que está organizada en tres fases denominadas de exploración, indagación y aplicación. Los criterios en los que nos hemos fundamentado para elegirla se exponen a continuación:

Desde nuestro punto de vista, el aprendizaje de las Ciencias es una construcción de conocimientos, no la asimilación de una serie de contenidos que el profesor ha de transmitir a los alumnos, ni una simple adquisición de los conocimientos elaborados previamente. Por ello, las dos unidades didácticas ensayadas no consisten en una exposición de contenidos, sino que éstos se formulan y estructuran en torno a un programa de actividades mediante las que se pretende promover la construcción de conocimientos.

El conocimiento científico integra conceptos y modelos, procedimientos, destrezas, técnicas, estrategias, actitudes y valores. Los enfoques constructivistas dan por zanjado el dilema entre los procesos (estrategias, destrezas, técnicas…) y productos (conceptos, modelos…) de la Ciencia (Anderson, 1983; Millar y Driver, 1987). Desde esta perspectiva, consideramos que la enseñanza no debe ignorar ninguno de estos aspectos; de lo contrario, sólo se ofrecería una visión incompleta y distorsionada de la Ciencia y se desperdiciarían buena parte de los valores

formativos que justifican su inclusión entre los conocimientos básicos y obligatorios (Domínguez Castiñeiras, 2007).

La metodología constructivista ensayada integra los contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales de tal manera los primeros se construyen sobre el andamiaje de los segundos (Domínguez Castiñeiras, 2000; Domínguez Castiñeiras, García-Rodeja, Pro e Illobre, 2001; Domínguez Castiñeiras, 2007), y se incluyen, implícitos, los contenidos actitudinales que ayudarán al alumnado a desarrollar una concepción actualizada de la Ciencia y de la cultura científica. La integración de lo conceptual y lo procedimental permitirá poner de manifiesto el carácter funcional del conocimiento científico, muy deseable si pretendemos que los estudiantes perciban el aprendizaje de la Ciencia como algo útil e interesante para su vida diaria y su formación como ciudadanos.

Nuestro principal objetivo es que el alumnado perciba el conocimiento científico como un *corpus* teórico y procedimental fructífero a la hora de describir, interpretar y predecir situaciones, hechos y fenómenos de la realidad. Para ello diseñamos actividades que presentan situaciones problemáticas lo más abiertas y significativas posible (Díaz y Jiménez, 1999; García de Cajén, 2007), cuyo proceso de resolución permita la reflexión y reestructuración de los constructos teóricos y procedimentales de la Ciencia.

Las actividades deben ser lo suficientemente abiertas como para incluir los tres tipos de contenidos, independientemente de que las tareas sean de tipo práctico o más "teóricas", mentales (Domínguez, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1998-99). En esta misma línea, el diseño de las actividades se ha realizado siguiendo un modelo holístico (Caamaño, 1992; Del Carmen, 1995). Por ejemplo, en vez de enseñar directamente las técnicas necesarias para aprender a utilizar los métodos calorimétricos, proponemos que se utilicen los métodos calorimétricos como técnicas necesarias para desarrollar estrategias relacionadas con la determinación de las transferencias energéticas que suceden durante los procesos físicos y químicos. En estas estrategias se integran los procedimientos objeto de aprendizaje, junto con conceptos y actitudes cuyo aprendizaje también se pretende (García-Rodeja *et al*., 1994; Domínguez e Illobre, 1997).

Desde nuestra perspectiva metodológica, el alumno es el responsable de la evolución de sus concepciones, y el docente desempeña una labor facilitadora y mediadora, apoyándose en las estrategias que considere adecuadas para guiar a los estudiantes en la evolución de las observaciones, interpretaciones y predicciones de los alumnos hacia las de la ciencia escolar. Esta evolución de ideas tendrá lugar de modo paulatino, a medida que los que aprenden reconozcan en los constructos científicos un mayor poder explicativo (Pozo y Gómez Crespo, 1998). En consecuencia, las actividades deben diseñarse de manera que favorezcan oportunidades y situaciones de aula para que los estudiantes hagan explícitas,

identifiquen y valoren sus propias ideas, sean conscientes de las de sus compañeros y de las ideas de la ciencia escolar, y de esta manera se impliquen en el aprendizaje, valorando la utilidad y las limitaciones de las distintas perspectivas. En este sentido, recomendamos organizar un clima de debate en el aula mediante el trabajo en pequeños grupos. En este entorno, la argumentación cobra un papel destacado en las diferentes situaciones de aprendizaje: los alumnos exponen sus ideas, emiten y comunican sus propias hipótesis y conclusiones, y elaboran sus propios argumentos para justificarlas (Domínguez, 2007).

Dado que algunas ideas alternativas son extraordinariamente resistentes al cambio, hemos considerado insuficiente el simple planteamiento del conflicto o del hecho discrepante (Hewson, 1981; Posner *et al.*, 1982): es necesario proponer actividades capaces de introducir nuevas ideas, y de ayudar a transferir estas nuevas ideas a distintos contextos utilizando diferentes estrategias. Por ello, las actividades de las secuencias ensayadas parten de una situación, hecho o fenómeno de la realidad observable y lo más cercana posible a las experiencias del alumnado, y se abren a los constructos teóricos y procedimentales de la Ciencia y a otras realidades culturales. La realidad perceptible o cercana al alumnado proporciona la base para plantear un problema teórico concreto que, a su vez, pone de manifiesto la necesidad de formular hipótesis y contrastarlas (Díaz y Jiménez, 1999; García de Cajén, 2007). Con ello se logra un punto de partida para que el alumnado perciba la importancia de formular teorías científicas, discuta las causas de la aceptación o rechazo de las teorías propuestas, y considere las limitaciones y el poder explicativo de las mismas utilizando el razonamiento y la argumentación. La resolución de problemas abiertos consigue un propósito que va más allá de la mera introducción del tema, y se dirige hacia la reflexión y reestructuración de los constructos teóricos y procedimentales de la Ciencia.

Además, con el planteamiento de problemas teóricos se puede relacionar el nivel observacional con el explicativo mediante proposiciones que permiten confrontar el lenguaje cotidiano con el lenguaje científico y, de este modo, introducir éste en el aula.

Las fases de exploración, indagación y aplicación propuestas por Ollerenshaw y Ritchie (1997) permiten el desarrollo de todos estos aspectos en un conjunto de actividades que conforma una secuencia. Por ello, cada una de las dos unidades didácticas ensayadas se desarrolla mediante las fases de exploración, indagación y aplicación de Ollerenshaw y Ritchie (1997), que recomendamos para estructurar no sólo las secuencias de actividades, sino las partes o bloques en las que éstas se dividen, y las propias actividades.

La *Tabla 1* recoge los objetivos de las diferentes fases en las que se estructuran las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química*:

Tabla 1: fases en las que se organiza la secuenciación y desarrollo de las actividades que conforman las propuestas didácticas Termoquímica y Termodinámica Química (adaptado de Ollerenshaw y Ricthie, 1997)

Fase de exploración: a partir de un determinado aspecto de la realidad, se pretende fomentar la expresión personal del conocimiento cotidiano para llegar a la síntesis del conocimiento implícito: *Orientación*: se busca despertar el interés y la curiosidad de los alumnos; *Estimulación/estructuración*: se busca ayudar a los alumnos a hacer explícito y a clarificar lo que piensan.
Fase de indagación: se pretende fomentar un proceso diversificado, mediante el cual se demanda la síntesis del conocimiento explícito, escolarmente construido: *Intervención/reestructuración*: se busca animar a los estudiantes a probar sus ideas (mantenerlas, desarrollarlas o reemplazarlas); *Reestructuración*: se busca ayudar a los alumnos a reconocer el significado de lo que han percibido y de cómo lo han interpretado, e informarles sobre las ideas clave y los modelos de la ciencia escolar, enseñándoles a utilizarlos como fundamento de sus percepciones y explicaciones.
Fase de aplicación: se pretende fomentar la transferencia del conocimiento aprendido a la explicación de nuevas situaciones, acontecimientos y experiencias de la vida diaria. Esta transferencia se basa en el análisis, la reflexión y la acción.

Más adelante (*Descripción de las actividades de la secuencia Termoquímica*, pág. 475) se describe la estructuración interna de las secuencias de actividades en bloques, cada uno de los cuales también se desarrolla según las etapas de Ollerenshaw y Ritchie (1997):

Dentro de cada bloque hay actividades de exploración, que tienen por objeto presentar al alumnado el tema de estudio y que los estudiantes hagan explícitas sus ideas a propósito de problemas concretos; hay actividades de indagación, a través de las cuales se presentan nuevas perspectivas que los alumnos deben analizar y sopesar, evaluando en qué medida sus interpretaciones deben mantenerse, modificarse o sustituirse por otras más funcionales desde el punto de vista interpretativo; y se incluyen actividades de aplicación, orientadas a la síntesis y transferencia de los conocimientos construidos a nuevas situaciones y contextos, y a la reflexión personal sobre el proceso de aprendizaje.

A continuación se exponen los fundamentos teóricos para el desarrollo de la metodología en función las fases de de Ollerenshaw y Ritchie (1997):

Fase de exploración: a partir de un determinado aspecto de la realidad, se pretende fomentar la expresión personal del conocimiento cotidiano para llegar a la síntesis del conocimiento implícito.

El desarrollo de *Termoquímica* y *Termodinámica Química* comienza con una primera fase de exploración, en la que se proponen varias actividades teóricas o experimentales que tienen por objetivo hacer explícitos los conocimientos de los alumnos sobre unos determinados hechos, situaciones o fenómenos. Mediante la realización de experiencias sencillas, la consulta de datos y el intercambio de ideas, los alumnos elaboran sus propios discursos explicativos para para justificar sus observaciones y contrastar las hipótesis que ellos mismos hayan planteado.

Consideramos muy conveniente que las actividades de exploración trabajen sobre realidades conocidas por los alumnos, y a ser posible relacionadas con sus necesidades próximas, sus vivencias y sus experiencias. Este planteamiento permite explorar las ideas del alumnado y dota de sentido los contenidos de aprendizaje, porque los estudiantes aprenden mejor y están más motivados para hacerlo si lo que se les enseña mantiene una relación directa con sus preocupaciones, intereses y preferencias (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27).

Para producir un aprendizaje significativo de los conocimientos que se pretenden fomentar (*Los conocimientos deseables desde la ciencia escolar*, pág. 291), es condición necesaria la expresión personal del conocimiento cotidiano de los estudiantes, porque construirán los nuevos significados a partir de aquéllos con los que llegan al aula (Pozo, 1999). Aunque el conocimiento cotidiano juega un papel central en los razonamientos y las acciones de las personas, forma de tal modo parte de la vida cotidiana que rara vez pensamos en él (Wolpert, 1994). Tampoco solemos ser conscientes de los contextos específicos en los que tiene validez, es decir, capacidad para abordar problemas en un determinado ámbito. El sentido común tiene gran potencialidad para resolver los problemas de la vida cotidiana, gracias a su gran cantidad de reglas prácticas y su más que aceptable lógica.

En este sentido, aprender Ciencias implica que los estudiantes adquieran una nueva cultura diferente de la cotidiana (Driver *et al.*, 1994). Se podrá considerar que han adquirido la cultura científica cuando se demuestren capaces de utilizar de forma autónoma los recursos propios de ésta.

Según Hodson (1998), la educación científica constituye un proceso de "enculturación" (o de adquisición de la cultura científica): requiere que los estudiantes se inicien en los recursos culturales propios de la comunidad de una disciplina científica. En un estudio contemporáneo al citado de Hodson, Solomon (1998) [citado en Domínguez Castiñeiras (2000)], define como "aculturación" la sustitución de la cultura que han adquirido los estudiantes en su comunidad, por la cultura científica. Este proceso de aculturación definido por Solomon parece

identificable, hasta cierto punto, con el proceso de cambio conceptual que describen Duschl y Hamilton (1998), en el sentido de que también supone la sustitución de unos constructos (en este caso, culturales) por otros, y requiere un largo período de tiempo y un considerable esfuerzo cognitivo.

El conocimiento cotidiano no es necesariamente desacertado, porque en él están presentes las tres componentes básicas de todo conocimiento (cognitiva, contextual y social). Dado que los procesos y productos sociales y culturales mantienen una poderosa y continua influencia sobre los procesos cognitivos individuales, con los cuales están estrechamente relacionados, intentar desplazar el conocimiento cotidiano a favor del conocimiento científico sería una tarea titánica que, por otra parte, tampoco parece deseable emprender. ¿Qué motivos se pueden aducir para invertir recursos educativos y un gran esfuerzo en anular el conocimiento con que los estudiantes llegan al aula de Ciencias? Por otra parte, los propios científicos recurren a sus concepciones intuitivas para realizar predicciones simples acerca de los hechos y fenómenos cotidianos, lo que sugiere que las concepciones científicas no reemplazan a las previas, sino que coexisten con ellas (Chi, 1992). En una perspectiva revisada del cambio conceptual, la construcción de los conceptos científicos no presupone el abandono de las concepciones previas (Jiménez Aleixandre, 2003), sino la toma de conciencia de que la misma palabra o concepto puede adoptar distintos significados en función del contexto. Cada una de las acepciones o interpretaciones de una palabra o concepto es válida en una serie de contextos. La plena consciencia de qué significado es aplicable en cada situación y bajo unas determinadas condiciones, es un paso necesario para que los alumnos se comuniquen de manera adecuada en los distintos contextos (*Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 202), e implica un mayor control de la propia cognición, del propio aprendizaje. En este sentido, el cambio conceptual no consiste en un auténtico cambio efectivo que supone abandonar las ideas cotidianas, sino en un cambio evolutivo en el perfil conceptual (Mortimer, 1995): con el aprendizaje, las nuevas ideas y las antiguas se aplicarán de la manera que resulte más adecuada a cada contexto (Driver, Asoko, Leach y Mortimer, 1994).

Desde nuestros compromisos teóricos, estamos en desacuerdo con la idea de erigir el conocimiento científico en martillo de herejes frente al conocimiento cotidiano (Domínguez Castiñeiras, 2000). Pretendemos que los estudiantes no renuncien a sus conocimientos cotidianos, que son útiles en determinados ámbitos y contextos de su vida diaria y además forman una base importante de sus esquemas afectivos. En la línea de Arnay (1997), proponemos compatibilizar el conocimiento científico escolar, más explícito, con el conocimiento cotidiano, mucho más basado en lo implícito. La coexistencia de ambos permitirá a los estudiantes explicar la realidad desde un nuevo punto de vista sin renunciar a conocimientos que no dejan de ser válidos en algunos contextos relacionados con su entorno inmediato. Las

concepciones iniciales pueden experimentar grandes cambios, pero en todo caso los nuevos conceptos (científicos) no necesariamente van a reemplazar a los anteriores y, de hecho, ni siquiera tienen por qué afectar a su utilización en los contextos cotidianos (Mortimer, 1995). Con el aprendizaje, el alumno pasa a disponer de diferentes representaciones de lo aprendido, y puede optar por la aplicación de la adecuada en cada contexto (Driver, Asoko, Leach y Mortimer, 1994).

Con este propósito de compatibilizar ambos tipos de conocimiento, y dado que los nuevos significados se construyen a partir de los que los estudiantes ya poseen, proponemos que se deje entrar el lenguaje cotidiano en el aula de Ciencias. De esta manera, se propician numerosas situaciones de aprendizaje que se pueden aprovechar para hacer ver al alumnado la necesidad de construir un nuevo lenguaje, el científico, que tiene mucha mayor precisión que el lenguaje cotidiano. En ocasiones, las mayores dificultades para aprender el lenguaje científico no están en la introducción de palabras nuevas para los alumnos (como exergónico, anfipático, ribosoma…) sino en el uso científico de palabras que tienen un significado cotidiano conocido; es necesario que los estudiantes construyan para estas palabras un significado nuevo en el marco de las explicaciones científicas. Por ejemplo, la palabra "vivo" suele utilizarse en la vida diaria como antónimo de "muerto", pero en Biología es antónimo de "inanimado": los seres de especies en la actualidad extintas pertenecen a la categoría de seres vivos, aun cuando no se encuentre "vivo" ni un solo ejemplar (Jiménez Aleixandre, 2003). Y la energía, que en la vida diaria se puede referir al ánimo o la vitalidad de una persona, en Ciencias tiene un significado muy distinto y todavía en discusión (*Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 202). Para no generar problemas de comunicación en el aula, los docentes no deben dar por supuesto que los alumnos son conscientes de las diferencias de significado entre el lenguaje cotidiano y el lenguaje científico.

Hasta ahora hemos desarrollado ideas provenientes de enfoques generalistas del conocimiento, como las citadas de Arnay (1997) y Pozo (1999). Pero los resultados de las investigaciones del enfoque sociocognitivo limitan las tesis generalistas, al indicar que los conocimientos cotidiano, científico escolar y científico no son ni epistemológicamente equiparables, ni transferibles de unos contextos a otros sin más. Autores como Cunningham (1996) o Kelly y Crawford (1996) sostienen que los conocimientos adquieren unos determinados sentidos en consonancia con los contextos en que se aprenden y utilizan.

También apuntan en este sentido las investigaciones sobre cognición situada, según las cuales el conocimiento conceptual no puede disociarse de la situación en la cual se aprende (Brown, Collins y Duguid, 1989). La cognición aparece situada en el dominio en el que aprende porque la construcción de los significados se produce a partir de acciones discursivas (Yerrick, Pedersen y Arnason, 1998). Este enfoque pone de manifiesto la importancia de llevar a las aulas de Ciencias la construcción

social del conocimiento científico, que numerosos autores confirman como esencial (por ejemplo, ver Hodson, 1998; Duschl, 1995, 1997): en el aula y en el laboratorio de Ciencias, estudiantes y profesor construyen los significados de la ciencia escolar al desarrollar interacciones mediadas por las prácticas discursivas.

En línea con las tesis de los enfoques sociocognitivo y de cognición situada, concluimos que desde la ciencia escolar debe utilizarse el sustrato del conocimiento cotidiano para crear oportunidades que ayuden a los alumnos a hacer evolucionar en complejidad sus conocimientos iniciales, más implícitos, hacia los explícitos de la ciencia escolar. Esta base sociológica del conocimiento nos lleva a proponer la fase de exploración como la primera etapa del desarrollo de cualquier eje temático.

Consideramos que las actividades se deben diseñar y planificar de manera que partan de una realidad cercana sobre la que los alumnos trabajarán individual y colectivamente, utilizando sin inhibiciones el lenguaje que surja de manera espontánea de la interacción entre iguales. Para que el docente pueda intervenir y ayudar a introducir el lenguaje de la ciencia escolar cuando las necesidades discursivas lo requieran, se debe acostumbrar a los estudiantes a la presencia del profesor en sus discusiones. Con esta dinámica de trabajo se promueve que los alumnos hablen científicamente: que utilicen las expresiones aceptadas por la comunidad científica y que desarrollen las prácticas discursivas propias de la Ciencia: observar, describir, analizar, argumentar, comunicar… (Lemke, 1997) Así, en cierta medida, los alumnos participan del lenguaje de la Ciencia.

Fase de indagación: se pretende fomentar un proceso diversificado, mediante el cual se demanda la síntesis del conocimiento explícito, escolarmente construido.

Para que la ciencia escolar se desarrolle desde la indagación sobre el entorno inmediato (Duschl, 1995, Duschl, 1997; Jiménez, 1998; Díaz y Jiménez, 1999), las actividades presentarán situaciones, hechos o fenómenos sobre los que se plantean interrogantes que no se pueden responder utilizando la percepción analítica inmediata (Arnay, 1997; Pozo y Gómez Crespo, 1998). Ante este tipo de interrogantes, el conocimiento experiencial demanda nuevos conocimientos dirigidos a construir sistemas explicativos causales (Claxton, 1993; Arnay, 1997). Sobre esta base se introducen gradualmente las teorías y modelos de la ciencia escolar, y se fomentan estrategias para profundizar en el conocimiento científico.

Con la fase de indagación se promueve la integración de las componentes cognitiva y social del aprendizaje, al fomentar el aprendizaje de técnicas y destrezas útiles para la indagación y para el registro sistemático de datos y búsqueda de regularidades. Como se ha explicado en *La indagación sobre el proceso de aprendizaje. La teoría de los esquemas* (pág. 43), estas técnicas y destrezas se integran en los esquemas de acción (Domínguez *et al.*, 1998-99).

En esta fase se desarrolla también un proceso de reestructuración que es fundamental en el aprendizaje, puesto que con él se desarrollan esquemas de razonamiento mediante los cuales los alumnos pueden apreciar la utilidad de la ciencia escolar (Domínguez *et al.*, 1999).

No pretendemos que los estudiantes actúen como científicos, porque, evidentemente, no lo son (Gil, 1993; Pro *et al.*, 1997), y la enseñanza no puede esperar de ellos que (re)construyan por sí solos los conocimientos que tanto tiempo y esfuerzo han exigido a los científicos. Las propuestas metodológicas basadas en el "redescubrimiento" de la ciencia escolar por parte de los alumnos (empirismo, elemento comprobatorio, ensayo y error, reduccionismo cientifista, individualismo, mecanicismo…) son inadecuadas desde el punto de vista didáctico:

En primer lugar, parten de un planteamiento contradictorio con la evolución de la Ciencia (*Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar*, pág. 15), y no resultan rentables si las sopesamos desde la relación entre el tiempo dedicado a la tarea y el aprendizaje producido. Además, pueden producir aburrimiento y desencanto en los alumnos: aburrimiento, por tener que aplicar repetidamente las pocas estrategias intuitivas que conocen, y desencanto por no percibir logros en el aprendizaje (Gil, 1986; López, 1990; Hodson, 1994; Niaz, 1994). Los que aprenden demandan que se les proporcione una cierta sensación de seguridad en la construcción del conocimiento, unas garantías de avanzar (Solomon, 1998; Hodson, 1990).

Sí es razonable una aproximación relacionada con el concepto de aprendizaje por descubrimiento (Barrón, 1993), que tiene como punto de partida la identificación de un problema y se desarrolla con la resolución del mismo mediante la comprobación de las conjeturas personales de manera autorregulada y creativa. La potencialidad para producir descubrimiento es inversamente proporcional al grado de predeterminación, y va estrechamente asociada a la producción de errores. Como resultado del aprendizaje por descubrimiento, se generan construcciones intrapsíquicas novedosas, consustanciales con la mediación sociocultural.

En este sentido, con las dos propuestas didácticas ensayadas pretendemos que los estudiantes sientan la necesidad de elaborar razonamientos justificativos que permitan argumentar científicamente para resolver las tareas planteadas en las actividades, verificando o refutando hipótesis y justificando comportamientos de los sistemas y procesos objeto de estudio. En la fase de indagación, se ayuda y anima a los estudiantes a probar sus ideas, mantenerlas, desarrollarlas o reemplazarlas; a reconocer el significado de lo que han percibido y a sistematizar los conocimientos, de manera tal que asienten los modelos que explican, justifican o predicen el comportamiento de los sistemas objeto de estudio. A lo largo de este proceso, muy complejo y diversificado, surgen numerosos interrogantes cuya respuesta demanda razonamientos justificativos e interpretativos, que se han de construir utilizando los conceptos y modelos de la ciencia escolar.

Los alumnos que constituyen la muestra de esta investigación son de 2º de Bachillerato, y la construcción de determinados contenidos teóricos de la Ciencia en estos cursos se complica por el alto nivel de abstracción y las consecuencias que esto trae consigo:

Muchos de los conocimientos científicos básicos, que son objeto de aprendizaje en los primeros años de escolarización en Ciencias, pueden aplicarse fácilmente a situaciones de la vida diaria. Por ejemplo, el concepto termodinámico clásico (macroscópico) de temperatura es una propiedad muy útil para describir los sistemas materiales. Sin embargo, a partir de determinado nivel académico, la abstracción de los conocimientos científicos se dispara, y la complejidad de los constructos teóricos hace que éstos dejen de tener tanta relevancia y sentido en su aplicación a los problemas cotidianos. Además, estos conocimientos de alto nivel solamente pueden construirse con el lenguaje científico y con modelos científicos bastante complejos (Arnay, 1997). También muchas estrategias, técnicas y procedimientos de la Ciencia pueden volverse irrelevantes para los alumnos a partir de cierto nivel de la enseñanza.

¿Qué decisiones se deben tomar sobre estos conocimientos científicos con pleno significado y significatividad para la comunidad científica, pero irrelevantes para los alumnos no universitarios? Pensemos, por ejemplo, en conceptos termodinámicos como la funciones de Gibbs y Helmholtz: ¿qué utilidades cómodas, inmediatas, podemos encontrarles para describir, justificar o predecir las situaciones que encontramos en nuestras experiencias cotidianas?

Otero (1989) nos advierte sobre los riesgos de trasladar estos conocimientos desde los contextos de la actividad científica al contexto escolar sin más objeto que el de mera transmisión de contenidos teóricos de un programa al que los estudiantes deben adaptarse. Este autor distingue entre la ciencia pública y la ciencia privada para caracterizar los contextos de descubrimiento y de justificación; y señala que las estructuras conceptuales se presentan en la escuela atendiendo a la relevancia que tienen para llegar a unas determinadas conclusiones, sin tener en cuenta el proceso en el que fueron construidas. Pero este enfoque del que habla Otero presenta algunas insuficiencias, porque se aleja de la naturaleza del conocimiento científico y de la esencia y las finalidades de la ciencia escolar.

Para hacer asequibles al alumnado los constructos más abstractos de la Ciencia, consideramos que no se debe disfrazar la complejidad del conocimiento científico en una "versión escolar" que se mantenga a salvo de las polémicas y los aspectos problemáticos de la construcción del conocimiento científico. Consideramos necesario que se alcance un referencial entre los docentes para esclarecer los puntos de controversia en la comunidad científica sobre la definición y contextualización de determinados conceptos y enunciados (Pro *et al.*, 1997), que son muchos y abarcan conceptos tan diversos e importantes como, por ejemplo, la masa

(Zalamea y París, 1992). En el ámbito de la Termodinámica podemos citar diversas polémicas de este tipo, referidas a los conceptos de calor (Erickson, 1979, 1980; Fernández, 1986; Cervantes, 1987; Hierrezuelo y Montero, 1987; Vázquez Díaz, 1987; Michinel y D'Alessandro, 1994; Levine, 1995; Domínguez Casitñeiras, 2000), energía (Warren, 1982, 1986; Sevilla, 1986; Solomon, 1986; Hierrezuelo, 1986; Michinel y D'Alessandro, 1994), entropía (Bickford, 1982; Howard, 2001; Lambert, 2002a y b; Gary, 2004; Lambert, 2006)…; dificultades que sólo en muy contados casos se llegan a formular en la elaboración del *curriculum* oficial, y que la puesta en práctica en las aulas por parte del profesorado tampoco parece tener en cuenta.

Esta problemática es especialmente aguda en caso de los modelos científicos más avanzados, cuyo gran nivel de formalismo hace que resulten difícilmente comprensibles y utilizables por la mayoría de los estudiantes de Secundaria. ¿Debemos eliminar estos modelos de la enseñanza de las Ciencias? Esta decisión no se sostiene, puesto que la propia edificación teórica de los modelos conserva todo su valor didáctico (Halwachs, 1983), y en varios campos de la Ciencia los modelos pueden actuar como esquemas integradores en el aprendizaje (*National Research Council*, 1996). Por otra parte, se ha demostrado que los estudiantes aprenden y utilizan modelos desde una edad muy temprana (Schauble, Klopfer y Raghavan, 1991; Driver, Newton y Osborne, 2000).

La investigación pone de manifiesto que la utilidad de los modelos interpretativos en la Ciencia está avalada por más factores que las posibilidades que éstos ofrecen en la explicación de fenómenos: también las necesidades previas, los conocimientos y la estabilidad que presentan en el tiempo los respaldan como constructos imprescindibles en Ciencias (Johsua, 1986; Izquierdo, 1988; Meheut, Larcher y Chomat, 1988).

La modelización es un proceso crucial en la construcción del conocimiento científico. La nueva filosofía de la ciencia ha pasado de una concepción de la "Ciencia como experimentación" a la "Ciencia como construcción y revisión de una explicación o modelo" (Duschl y Grandy, 2008), recogiendo la idea de que modelar es la esencia de pensar de manera científica (Harrison y Treagust, 2000a). Para algunos autores, en el constructivismo, el aprendizaje consiste en construir modelos para interpretar la información que se recibe (Moreno y Waldegg, 1998).

Los modelos son una poderosa herramienta epistemológica y motivacional en la enseñanza de la Ciencia, porque proporcionan medios para explorar, describir y explicar científicamente (Harrison y Treagust, 2000a), y en su comprensión, construcción, utilización y validación se involucran varias destrezas, estrategias y creencias epistemológicas (Harrison y Treagust, 2000a; Justi y Gilbert, 2002).

Teniendo en cuenta estos resultados, consideramos que está plenamente fundamentada la inclusión de los modelos interpretativos entre los contenidos objeto de aprendizaje en Ciencias. No obstante, a la hora de concretarlos en la

secuenciación de los contenidos del programa de Ciencias, su construcción debe ser escalonada (Castro, 1992) y adecuarse a las capacidades cognitivas de los alumnos (Benarroch, 1989), dada la demanda cognitiva de los modelos (Shayer y Adey, 1986); se necesita un proceso de transposición didáctica que dé lugar a los modelos para la enseñanza (Justi, 2006) o, para otros autores, modelos enseñados (Treagust *et al.*, 2003). Por último, los estudiantes necesitan disponer de situaciones donde sean capaces de percibir la posibilidad de transferir los conocimientos adquiridos a nuevas situaciones, hechos y fenómenos (Domínguez *et al.*, 1998a, 1998b).

El *National Research Council* (1996) aporta una serie de directrices sobre los modelos científicos y la necesidad de que los alumnos comprendan y utilicen la modelización científica:

- Los modelos son esquemas o estructuras de prueba que corresponden a objetos, sucesos o clases de sucesos, y tienen poder explicativo para un propósito específico. El significado del concepto *modelo* ha sido discutido por especialistas de distintos campos del conocimiento, y el punto de vista más aceptado es el que considera los modelos como representaciones de ideas, objetos, acontecimientos, procesos o sistemas (Justi, 2006).
- Los modelos son instrumentos explicativos enmarcados en teorías científicas, construcciones imaginarias de un objeto o fenómeno (o de un conjunto de ellos), tal que permiten estudiar de manera teórica un aspecto de la realidad al que se llama referente. El comportamiento del modelo se debe aproximar a la realidad, y para estudiar una situación real se pueden utilizar distintos modelos, ya sea porque existen distintos aspectos del referente, o porque existen distintas concepciones con respecto a lo que caracteriza al modelo.
- Los modelos adquieren diferentes formas, incluyendo objetos físicos, planes, constructos mentales, ecuaciones matemáticas y simulaciones por ordenador.
- El modelo es un instrumento muy potente de representación de las teorías, y puede servirse de diferentes lenguajes (Giere, 1999): suele representar los aspectos modelizados de manera verbal (declarativa), aunque puede apoyarse en recursos visuales como dibujos, gráficas, montajes mecánicos, simulaciones virtuales, simbología matemática… La "representación" no se limita a la exhibición de aspectos visuales de la entidad modelizada, sino también a su abstracción o "traducción". La expresión verbal de los modelos científicos admite también recursos como metáforas, analogías, supuestos sencillos o paradojas. Todos estos elementos actúan de intermediarios entre los modelos científicos y las ideas de los alumnos, en la relación que Justi (2006) denomina *teaching models* (modelos para la enseñanza). Para Schwarz y White (2005), no toda representación es un modelo, sino sólo aquéllas que permiten generar predicciones sobre los fenómenos además de explicarlos.

- Los modelos ayudan a los científicos e ingenieros a comprender cómo funcionan las cosas. Entre sus múltiples aplicaciones encontramos las de representar el mundo mediante el pensamiento humano, simplificar fenómenos complejos, ayudar en la visualización de entidades abstractas, y apoyar la interpretación de resultados experimentales, la elaboración de explicaciones la propuesta de previsiones, como han destacado numerosos autores (ver Justi, 2006).

De esta directriz se desprende la necesidad de que los estudiantes comprendan cómo se construyen los modelos científicos, con la finalidad de que lleguen a entender cómo se construye conocimiento en Ciencias. La investigación pone de manifiesto que para entender los modelos se necesitan diversos conocimientos declarativos (conceptuales) y procedimentales.

¿Cómo se tratan convencionalmente los modelos en la enseñanza de las Ciencias? Por lo general, se los restringe casi exclusivamente a la diferenciación conceptual en determinados casos, como sucede para los conceptos de calor y temperatura (Domínguez, 2000).

En la enseñanza tradicional, los modelos químicos relacionados con la estructura de la materia suelen presentarse a los estudiantes como "versiones finales" de nuestro conocimiento sobre la misma; por ejemplo, como copias de las moléculas reales (Grosslight, Unger, Jay y Smith, 1991). Esta concepción elimina las estrategias y argumentos que subyacen al desarrollo, evaluación y revisión de los modelos científicos. En ocasiones se presentan ideas de diferentes modelos como partes integrantes de un único instrumento interpretativo, en lo que constituye un "modelo híbrido" (Caamaño, 2003). Un ejemplo que se repite con frecuencia en los libros de texto españoles es el modelo híbrido basado en el modelo de colisiones que incluye una serie de conceptos y representaciones de la teoría del estado de transición; el modelo se completa con la construcción del diagrama de energía del sistema reaccionante, en el que no se especifica que los conceptos de energía del complejo activado y energía del estado de transición proceden de aproximaciones teóricas diferentes (respectivamente, de la teoría de colisiones y de la teoría del estado de transición). Aunque se trabaje con modelos en la clase de Ciencias, casi nunca se enseña a los alumnos a construir modelos (Justi y Gilbert, 2002), tarea muy compleja que involucra diversas destrezas y estrategias.

La investigación ha detectado dificultades en el aprendizaje significativo de los modelos científicos, y se distinguen tres niveles de comprensión (Carr, 1984):

En el primer nivel, los estudiantes consideran los modelos como copias de la realidad diseñadas intencionadamente por los científicos, de ahí su mayor o menor alcance y grado de complejidad. En un segundo nivel de comprensión, los modelos pasan a percibirse como productos científicos que tienen un propósito específico y omiten o mejoran determinados aspectos de la realidad. Solamente en el tercer nivel

se observa que los estudiantes hacen más énfasis en las ideas representadas por el modelo que en la realidad del objeto de la modelización, conciben los modelos como constuctos científicos elaborados para desarrollar ideas, y los utilizan como aproximaciones representativas de ciertos aspectos del mundo.

Pocos alumnos alcanzan el tercer nivel de comprensión, y muchas de las concepciones del primer y segundo nivel persisten incluso después de una instrucción explícita al respecto.

También se ha detectado un cierto paralelismo entre el pensamiento modelizador de los estudiantes y la evolución de algunas concepciones científicas históricamente superadas (Viennot, 1989; Mellado y Carracedo, 1993; Pro *et al.*, 1997). Son ejemplos algunas interpretaciones prenewtonianas en la relación entre fuerza y movimiento (Saltiel y Viennot, 1985), o la persistencia de creencias sobre una continuidad de la materia al interpretar la dilatación o los cambios de estado (Domínguez *et al.*, 1998a), que tienen una gran influencia en el aprendizaje.

Un modelo alternativo muy extendido que condiciona el aprendizaje de la Termodinámica (Erickson, 1979, 1980; Cervantes, 1987; Pessoa y Castro, 1992; Michinel y D'Alessandro, 1994), está en un conjunto de concepciones alternativas sobre las transferencias de energía, cuyo grado de organización es tal que prácticamente constituye un modelo completo y muy cercano al de la antigua teoría del calórico [*La energía y sus procesos de transferencia (calor y trabajo)*, pág. 145].

El aprendizaje relacionado con los modelos contribuye a dar significado a los conceptos y enunciados de la Ciencia, sirve para elaborar justificaciones a muy diversos hechos y fenómenos, y ayuda a comprender la evolución del conocimiento científico y a valorar el proceso de la investigación; además, combate la tendencia a inventar "misterios" para interpretar el mundo (Domínguez *et al.*, 2003). Por estas razones, consideramos que es necesario dedicar más atención a la enseñanza y el aprendizaje de los modelos científicos en los diferentes niveles de la enseñanza (Domínguez, 2000), facilitando a los estudiantes la oportunidad de trabajar sobre la formulación, evaluación y revisión del conocimiento científico.

Fase de aplicación: se pretende fomentar la transferencia del conocimiento aprendido a la explicación de nuevas situaciones, acontecimientos y experiencias de la vida diaria.

Durante la fase de aplicación se anima y ayuda a los estudiantes a relacionar lo aprendido con algunas experiencias de su vida diaria. Utilizando los conceptos y modelos construidos, los estudiantes podrán elaborar razonamientos justificativos sobre diversas situaciones y fenómenos y, transfiriendo sus conocimientos, serán capaces de explicar, justificar y predecir nuevos casos. Aquí cobra importancia la activación de esquemas de razonamiento adecuados desde la ciencia escolar, útiles

en la descripción e interpretación del mundo (Domínguez *et al.*, 1999). El interés de la fase de aplicación se justifica por su utilidad para poner de manifiesto el carácter funcional del conocimiento científico y ofrecer la posibilidad de contrastar el aprendizaje generado.

En las dos propuestas ensayadas, las actividades se diseñaron y planificaron con el objetivo de que la ciencia escolar se convierta para los alumnos en un instrumento útil y funcional en el análisis, la reflexión y la acción en relación con el propio entorno (Claxton, 1987, Claxton, 1994; Arnay, 1997). Con este propósito, decidimos priorizar la cultura científica escolar frente a la transmisión de información y otros rasgos de la "cultura escolar", para lo cual es necesario promover la implicación activa del docente y el alumnado sobre la base de un clima de aula en el que los estudiantes se sientan parte protagonista y necesaria del proceso de construcción del conocimiento, y en el que se valore el papel del profesor como indispensable ayuda y guía. Estas condiciones favorables al aprendizaje se refuerzan mediante el trabajo cooperativo (Driver, Newton y Osborne, 2000) entre iguales (los alumnos entre sí) y entre iguales y experto (interacciones alumno-docente). Así, las actividades se diseñaron de tal manera que se realicen en pequeño grupo, para favorecer el intercambio de ideas y la comunicación permanente entre los estudiantes y con el profesor. La dinámica de aula propuesta compatibiliza el trabajo en los pequeños grupos con el trabajo en gran grupo (grupo de clase) y con el desarrollo del trabajo individual, como se detalla en *El escenario de enseñanza y aprendizaje (organización del aula)* (pág. 293).

Las fases de exploración, indagación y aplicación (Ollerenshaw y Ritchie, 1997) se han aplicado a la estructura de las actividades, de los bloques de actividades y de la secuencia en su conjunto; pero se han tenido en cuenta más factores en el diseño y planificación de *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, de manera que se alcanzara un compromiso entre fidelidad al método y coherencia en su aplicación, sin restar flexibilidad a la secuenciación y desarrollo (*Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la investigación*, pág. 312).

En las cuatro secuencias de enseñanza constructivistas que hemos expuesto (Driver y Oldham (1986); Hodson (1988); Cosgrove y Osborne (1991); Ollerenshaw y Ritchie, 1997) se propone un proceso de modificación y ampliación de los paradigmas espontáneos de los alumnos para adecuarlos a los conocimientos de la ciencia escolar, en lo que parece ajustarse a lo que Hewson y Beeth (1995) denominan "normas sobre la enseñanza para el cambio conceptual": los modelos de debate que se formulan son explícitamente metacognitivos e incluyen la discusión y negociación del *status* de las ideas de los estudiantes. Esta concepción se relaciona con las premisas para el cambio conceptual a las que se refieren Posner *et al.* (1982):

El cambio conceptual solamente se puede producir si el estudiante se encuentra insatisfecho con sus ideas previas. Además, las nuevas ideas han de ser

inteligibles, plausibles y fructíferas en la interpretación de un amplio rango de fenómenos. Por estos motivos, las diferentes propuestas constructivistas ponen énfasis en que el alumnado llegue a percibir los contenidos de Ciencias como comprensibles, plausibles y, desde luego, útiles.

Para lograrlo, los que aprenden deben emitir hipótesis audaces y contrastarlas de manera rigurosa (Colombo, Salinas y Pesa, 1991). El docente ha de ayudarles a configurar y comunicar sus hipótesis, y animarlos a que cuestionen sus percepciones en un clima de aula en el que la discusión sea racional, fundamentada y revisada, refutando los razonamientos de "sentido común" (Hashweh, 1986).

También debe rechazarse la "metodología de la superficialidad" (Gil y Carrascosa, 1985b), por la que se tiende a emitir generalizaciones de una manera acrítica sobre la base de observaciones no controladas y poco o nada sistematizadas. Gil (1986) y Segura (1991) contraponen la metodología de la superficialidad a la metodología científica, y añaden algunas sugerencias orientativas para el diseño de propuestas didácticas:

- las actividades han de partir de preguntas concretas,
- se ha de facilitar la discusión de respuestas y la elaboración de predicciones,
- las opiniones de los estudiantes han de probarse empíricamente, y
- el docente ha de dirigir todo el proceso, orientando, retando, informando y creando situaciones de aprendizaje.

Hace unos treinta años, en la comunidad investigadora en Didáctica de las Ciencias se entabló un intenso debate sobre si el proceso de cambio conceptual es revolucionario o evolutivo (Nussbaum, 1989b). Una década después, Duschl y Hamilton (1998) abogaron por un cambio conceptual progresivo, en el que los estudiantes abandonan progresivamente su cultura para sustituirla por la científica.

A finales del siglo pasado, y en pleno debate sobre esta cuestión, autores como Gil (1986, 1993), Duschl y Gitomer (1991), Gruender y Tobin (1991) o Segura (1991) propusieron nuevas ideas que con el tiempo se han consolidado como un verdadero paradigma emergente que amplía el antiguo paradigma del cambio conceptual: la necesidad de lograr el cambio conceptual, metodológico y actitudinal. Desde diversas investigaciones se indagó en qué tipo de cambios se pueden producir y cómo tienen lugar (por ejemplo, Chi, Slotta y De Leeuw, 1994; Vosniadou, 1994), y quedaba claro que los progresos logrados con las estrategias de cambio conceptual resultaban insuficientes (Oliva, 1999), quizá en parte por el excesivo énfasis en forzar los cambios centrándose en realizar los procesos más radicales de reestructuración de ideas, dejando de lado los procesos "preparatorios" para el cambio conceptual, las modificaciones menores en las ideas, que en conjunto pueden impulsar una revisión sustancial de la estructura de los conocimientos (Pozo, 1996b). Desde el nuevo paradigma se cuestionó la posibilidad de que el

cambio de ideas se resuelva solamente mediante el conflicto cognitivo, puesto que en el proceso también juegan un papel principal otras componentes del conocimiento y del trabajo científico. De ahí la creciente consideración del aprendizaje como un proceso de indagación (Gil, 1993; Jiménez, 1998) sobre situaciones problemáticas abiertas (*Materiales de aprendizaje*, pág. 84).

Casi dos décadas después del nacimiento de este nuevo paradigma (Solbes, 2009), se ha alcanzado un cierto consenso sobre la necesidad de generar modelos didácticos que tengan en cuenta no solamente el cambio conceptual, sino también el metodológico y el actitudinal:

Buena parte de las dificultades en la adquisición significativa de los conocimientos científicos está en que los alumnos generan conocimientos de acuerdo con una epistemología espontánea (no científica) que se manifiesta en la utilización de criterios cotidianos de aceptación y validación de ideas. Si desde la enseñanza no se ayuda a los estudiantes a que adopten criterios basados en el modo en que se producen y aceptan los conocimientos en Ciencias, será difícil o imposible que admitan que las ideas científicas son "mejores", en el sentido de que son más útiles (Gil y Carrascosa, 1985a; Hashweh, 1986; Duschl y Gitomer, 1991). Se debe, pues, promover un cambio metodológico hacia formas de pensamiento y actuación propias del trabajo científico.

Los aspectos axiológicos, como los valores o el interés y las actitudes por las Ciencias y su aprendizaje, también determinan el grado de esfuerzo personal y, por tanto, la potencialidad de construir un aprendizaje significativo. El cambio actitudinal es una condición necesaria para hacer posible el cambio conceptual y metodológico, y desde la enseñanza de las Ciencias se recomienda que los tres tipos de cambio se promuevan de manera conjunta para que se retroalimenten entre sí (Duschl y Gitomer, 1991).

Si observamos la gran diversidad terminológica y semántica que se aprecia en la literatura científica, parece que aún queda camino por andar hacia un consenso más firme sobre el cambio conceptual, metodológico y actitudinal. En la revisión que realiza Solbes (2009) sobre el impacto del paradigma en Didáctica de las Ciencias, propone la terminología concreta de cambio conceptual, procedimental (metodológico) y axiológico, que adoptamos en esta investigación, porque permite englobar en la componente conceptual los cambios que se llaman epistemológicos, aunque éste es un término muy polisémico que se utiliza para referirse indistintamente a cambios en las estrategias de razonamiento, las visiones sobre la naturaleza de la Ciencia… Se denominan criterios epistemológicos las concepciones o creencias filosóficas acerca de la naturaleza, los límites y la adquisición del conocimiento. Estos criterios pueden dirigir los procesos de selección, planificación, seguimiento y evaluación de afirmaciones de conocimiento, y por tanto pueden modelar el cambio conceptual, y se relacionan con el cambio metodológico, porque

las creencias epistemológicas determinan cuáles son las estrategias de acción válidas en los distintos ámbitos y contextos (Hogan y Maglienti, 2001).

El paradigma que propone Solbes contempla en su vertiente conceptual el cambio relacionado con las categorías del pensamiento (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994), y el cambio en los principios que restringen la información procesada, que Vosniadou (1994) ha denominado cambio epistemológico y que se refiere a la modificación de los supuestos en los que se basan las estructuras de conocimiento de la persona. En la componente procedimental, Solbes (2009) incluye los aspectos relacionados con la adquisición de procedimientos del trabajo científico, de estrategias y destrezas generales del trabajo intelectual, y de destrezas manuales y estrategias metacognitivas (que tratan, por ejemplo, Campanario y Otero, 2000). La componente axiológica, por su parte, incluye actitudes, valores y normas.

Así pues, nos definimos en el marco del nuevo paradigma del cambio conceptual, procedimental y axiológico, que facilita la estructuración de los contenidos del *curriculum* en un programa de actividades encaminado a lograr un aprendizaje significativo de la ciencia escolar. En el marco de este paradigma integramos las diferentes contribuciones investigadoras que hemos citado en el presente apartado, y que, en mayor o menor medida, hemos tenido en cuenta a la hora de diseñar y planificar las dos unidades didácticas objeto de investigación.

I.3.3.3. Materiales de aprendizaje

Antes de revisar los principales materiales de aprendizaje utilizados en enseñanza de las Ciencias, aclararemos que en esta Memoria sólo se van a discutir aquellos tipos de recursos y tareas que muestren un cierto grado de coincidencia con los que hemos seleccionado en nuestra investigación. Por tanto, mantendremos al margen de esta exposición los recursos utilizados en la enseñanza asistida por ordenador (Gorga, Roso y Vacca, 1989; Barberá y Sanjosé, 1990; Valente y Neto, 1992; Herrán y Parrilla, 1994; Pontes, 1999), los materiales audiovisuales (Mas, Paniagua, Vilaseca y Barbosa, 1991; Llitjós, Estopa y Miró, 1994), y los libros de texto, que han ocupado la atención de muchos autores (Otero, 1990; Bauman, 1992a,b; Tamir y García, 1992; Del Carmen y Jiménez, 1997; Campanario, 2001, 2003), también en el tema de la Termodinámica (por ejemplo, Bauman, 1992a, 1992b; Michinel y D'Alessandro, 1994; Leite, 1999; Bañas, Mellado y Ruiz, 2004; Furió Gómez, Solbes y Furió, 2006; Quílez, 2009). Dado que esta investigación tiene por objeto diseñar, implementar y evaluar propuestas de enseñanza útiles para lograr un aprendizaje significativo, hemos optado por no utilizar otros materiales de referencia aparte de las propuestas ensayadas; los demás materiales se emplearon como recurso complementario en búsquedas de información. En las clases de Química, el grupo de 2º de Bachillerato que constituyó la muestra objeto de estudio, trabajaba habitualmente con un libro de texto; pero en las sesiones correspondientes

a las unidades didácticas sobre Termoquímica y Termodinámica Química, este libro sólo se utilizó para consultar las tablas de datos termodinámicos, tablas que no se facilitaron a los estudiantes precisamente para animarlos a recurrir por sí mismos a otras fuentes de información distintas de las que se suelen proporcionar explícitamente para la resolución de las cuestiones planteadas. En las entrevistas a los alumnos se les preguntó por sus opiniones acerca de las diferencias entre "estudiar por el libro" y "estudiar por las fichas" que constituyeron los materiales de referencia de las unidades *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, y las impresiones de todos (incluso de los que dejaron de asistir a las clases) fueron favorables a los nuevos materiales de trabajo.

Rescatando las principales ideas del marco teórico general que hemos expuesto, afirmamos que un *curriculum* basado en la transmisión de información es incoherente con las teorías actuales en Didáctica de las Ciencias. El aprendizaje significativo se ve favorecido cuando los estudiantes desarrollan un trabajo cooperativo sobre un programa de actividades cohesionado cuya finalidad es que progresen en sus sucesivas ZDP mediante el desarrollo de nuevas capacidades en interacción con sus iguales (compañeros) y con un experto (el docente). El profesor ejerce el papel de guía de este proceso, creando entornos de aprendizaje en los que los alumnos trabajan activa y conscientemente sobre sus propios conocimientos para llegar a modificarlos y ampliarlos de tal manera que cada vez les permiten una interpretación más fructífera y funcional de la realidad del mundo. El conocimiento que se pretende desarrollar integra aspectos conceptuales (conceptos y modelos) y procedimentales (destrezas, estrategias…), junto con una serie de actitudes, valores y normas que se consideran fundamentales en la construcción de una imagen actualizada de la Ciencia y de la actividad científica.

Consecuentemente con estas premisas, existen argumentos más que suficientes para respaldar la importancia que tiene la resolución de problemas en el aprendizaje de las Ciencias (Garret, 1988, 1995; Díaz, 1999; Díaz y Jiménez, 1999; Perales, 1993; Perales, 2000; Pro, 2003), en especial en lo que se refiere a la construcción de conocimientos relacionados con los aspectos procedimentales de la Ciencia.

Es necesario clarificar aquí qué entendemos por problemas, porque, aunque el papel de éstos en la Didáctica de las Ciencias ha adquirido una gran consideración, todavía no se ha alcanzado un consenso universal sobre la naturaleza y características de los mismos. De entre las revisiones que hemos citado, las más recientes analizan desde el punto de vista epistemológico los significados atribuidos al término problema, y concluyen que un problema es una situación que plantea dificultades para las que no existen soluciones únicas y establecidas de antemano.

Esta nueva perspectiva está bastante lejos de la visión tradicional del problema como ejercicio encaminado a que los alumnos se limiten a aplicar

conceptos o enunciados científicos. Es cierto que la concepción tradicional de los problemas-ejercicios se observa todavía en los libros de texto y sigue firmemente arraigada en la cultura escolar. Generalmente, los ejercicios de este tipo son numéricos o adoptan el formato de cuestión que se resuelve a partir de la lectura de un texto. Estos "problemas escolares" arquetípicos suelen tener un carácter general, y su relevancia para los estudiantes, si existe, es desde luego difícil de percibir (Jiménez, 1998). Desde nuestro punto de vista, la utilización de este tipo de ejercicios no es funcional para la construcción de conocimiento significativo, porque demanda una mera transferencia conceptual muy relacionada con la transmisión-recepción de información, y en muchas ocasiones la resolución del ejercicio consiste únicamente en transcribir un texto, sin requerirse apenas un esfuerzo de comprensión e interpretación de la situación planteada.

Si adoptamos la nueva perspectiva que concibe los problemas como situaciones para las que no existen soluciones únicas y preestablecidas, entonces sí se pueden utilizar éstos para construir conocimiento científico. Frente al modelo tradicional de problema, Díaz (1999) y Díaz y Jiménez (1999) definen el modelo de problema auténtico: un problema que implica una situación comprensible, ya sea real o simulada, pero en todo caso contextualizada en la vida cotidiana y que refleja la complejidad de la realidad (Couce, Domínguez y Álvarez, 1999; García de Cajén, Domínguez Castiñeiras y García-Rodeja, 2001). Según Jiménez Aleixandre (2003, capítulo 4), para que un problema pueda calificarse como auténtico, ha de cumplir los siguientes requisitos:

- Debe constituir un verdadero problema para el que lo resuelve, lo cual implica que la persona que lo ha de resolver no dispone de una respuesta obvia e inmediata. Garrett (1988) apuntó que una misma pregunta puede encerrar un problema o un ejercicio, dependiendo de los conocimientos de la persona que lo resuelve: si ésta domina todos los conceptos y procedimientos necesarios para dar respuesta a la pregunta, se enfrenta a un ejercicio; de lo contrario (en palabras de Garret, «si estos conocimientos exceden el umbral de problematicidad»), el individuo se enfrenta a un problema.
- Ha de estar contextualizado en la vida real. Esta concepción está relacionada con la relevancia de los contenidos científicos para el alumnado.
- Tiene que demandar, para su resolución, la puesta en marcha de procesos de indagación. La respuesta a un problema auténtico no puede hallarse mediante la búsqueda de información, sino que requiere el diseño y la realización de un proceso de resolución. Además, está planteado de manera que genera la mayor variedad posible de respuestas, lo que a su vez obliga al alumno a considerar diversas líneas de pensamiento y vías alternativas de resolución, y a poner en práctica destrezas y estrategias de alto nivel, que requieren un despliegue de gran riqueza epistémica en el tratamiento de la

información y, por tanto, ofrecen más posibilidades de desarrollar una auténtica cultura científica. Se trata de que los alumnos "hagan Ciencia" (Jiménez, Bugallo y Duschl, 2000).

Según Duschl y Gitomer (1996), la autenticidad de un problema viene determinada por dos componentes, que son el contexto (directamente relacionado con la relevancia del problema para los estudiantes) y los datos (directamente relacionados con el uso de pruebas).

En lo que respecta al contexto de los problemas, Roth (1995) hace hincapié en la necesidad que sienten los alumnos de relacionar las cuestiones con su conocimiento actual, para abordarlas y trabajar sobre ellas utilizando sus propias herramientas cognitivas. Esto nos condiciona a diseñar los problemas de manera que se sitúen en las zonas de desarrollo próximo (ZDP) de los que aprenden; de lo contrario, o no existe tal problema, o en todo caso no cabe esperar que éste genere aprendizaje (Díaz, 1999).

El segundo componente que determina la autenticidad de un problema se refiere a los datos aportados por el mismo y al uso de pruebas para resolverlo. Desde las actuales concepciones sobre la naturaleza de los problemas se rechazan aquéllos que se asientan sobre el tratamiento de los datos como punto de partida (descubrimiento). La resolución de un problema auténtico requiere que los estudiantes analicen los datos o las pruebas de la forma en que lo haría un científico: estableciendo relaciones sucesivas entre los datos y la teoría (Jiménez, 1998; García de Cajén *et al.*, 2001). Para elaborar este tipo de razonamientos, los que aprenden han de adoptar el lenguaje científico (Couce *et al.*, 1999), lo que los introduce en una nueva comunidad de discurso característico de una cultura científica.

Una de las causas de que los estudiantes mantengan la metodología de la superficialidad a la que aluden Gil y Carrascosa (1985), está en el hecho de que muchas de las tareas utilizadas en la enseñanza no se atienen a las características que se acaban de comentar. Sin embargo, los problemas-ejercicios de perfil tradicional, aunque carecen de autenticidad, pueden transformarse y adecuarse a los nuevos paradigmas (Gil, Carrascosa, Furió y Martínez-Torregrosa, 1991).

Consideramos que hay dos razones importantes por las que han de incluirse los problemas en el *curriculum* de Ciencias:

En primer lugar, porque la resolución de problemas está en las bases de la actividad científica (de Pro, 2003). En segundo lugar, porque aportan un punto de partida insustituible para el aprendizaje de aspectos procedimentales y actitudinales (técnicas y métodos científicos, actitudes científicas…), y, sobre todo, ayudan a trabajar estrategias que permiten a los alumnos profundizar en el desarrollo de sus estructuras de razonamiento y de argumentación, y a integrar teoría y método (Domínguez Castiñeiras, 2000).

Por estos motivos, recomendamos enfatizar en la necesidad de desarrollar aspectos procedimentales como la identificación del problema, la emisión de hipótesis o el establecimiento de predicciones, el diseño de experiencias y predicciones, el análisis de los resultados obtenidos, el establecimiento de conclusiones coherentes con el proceso de investigación, y la crítica de los resultados y las conclusiones obtenidas. En el apartado (*Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la investigación*, pág. 312) se explica cómo se han diseñado las actividades de las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* de tal manera que ayuden a trabajar en el aula estos aspectos procedimentales.

En los últimos años se ha dedicado un gran número de trabajos a contextualizar y analizar la resolución de problemas (Kempa, 1986; Contreras, 1987; Bastida, Ramos y Soto, 1990; Sigüenza y Saez, 1990; Perales, 1993; Perales, 2000), muchas veces tomando como referencia el propio proceso de resolución. Son menos numerosas las investigaciones que parten de la naturaleza de las Ciencias, como la de Barberá (1992), o las revisiones sobre el planteamiento y la resolución de problemas en ámbitos concretos, como pueden ser los del equilibrio químico (Camacho y Good, 1989) o de molaridad (Gabel y Samuel, 1986); en Termodinámica, el diseño de problemas también ha recibido poca atención de la literatura investigadora (*Propuestas y materiales de enseñanza en Termoquímica y Termodinámica Química*, pág. 198). La principal implicación que se desprende de los estudios realizados hasta la fecha es la necesidad de modificar el papel del profesor para poner en práctica todas estas consideraciones derivadas de la investigación en Didáctica de las Ciencias.

Entre los estudios de carácter general, Kempa (1986) identificó y clasificó distintos modelos de resolución de problemas y, sobre la base de esta clasificación, sugirió una secuencia de acciones para la resolución de los mismos:

1.- lectura de la cuestión;

2.- interpretación de la cuestión, en términos de tareas;

3.- selección de métodos para la resolución del problema;

4.- operación, apoyada en hechos e informaciones; y

5.- contraste (verificación o rechazo) de la respuesta.

En nuestra opinión, esta aportación de Kempa (1986) cuestiona el papel que se atribuye a los problemas en la enseñanza de las Ciencias, puesto que presupone una gran influencia de la memoria a largo plazo sobre el conocimiento proposicional, algorítmico y metodológico.

Pueden plantearse varios interrogantes concretos asociados al proceso de resolución de problemas: ¿Cómo emiten los alumnos hipótesis sobre un problema? ¿Qué coherencia tienen sus explicaciones sobre estas situaciones abiertas? ¿Cómo

orientarlos en la resolución? Para responder a estas preguntas, Gil, Martínez y Senent (1988a) han establecido una serie de diferencias entre lo que consideran un buen resolvente y un mal resolvente de problemas. Partiendo de estas reflexiones, Gil y Martínez (1987a); Del Carmen (1987) y Gil *et al.* (1988a, 1988b) enfocan la resolución de problemas como una investigación en la que se realiza una secuencia de acciones que el individuo desarrolla aproximadamente como sigue:

1.- estudio cualitativo del enunciado e identificación del problema;

2.- emisión de hipótesis, a partir del cuerpo idiosincrásico de conocimientos;

3.- elaboración de estrategias de resolución del problema;

4.- puesta en práctica de las estrategias elaboradas, desde una perspectiva científica, no exclusivamente matemática; y

5.- análisis y discusión de los resultados obtenidos.

En el esquema de acción referencial ***EA4*** (***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química***), que representa la estructura de acción en la que se integran los conceptos, las técnicas y las destrezas que se utilizan para resolver cuestiones científicas relacionadas con el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos, hemos asociado a la resolución de problemas una secuencia de acciones que recoge las principales acciones propuestas por Kempa (1986), Gil y Martínez (1987a); Del Carmen (1987) y Gil *et al.* (1988a, 1988b).

A principios de la década de los noventa, Perales (1993) especificaba algunas de las cuestiones que quedaban pendientes: ¿Cuáles son las variables más relevantes que describen la eficiencia en la resolución de problemas? ¿Qué tipo de estrategias efectivas habría que utilizar para llegar a una resolución eficiente? ¿Qué papel deben ocupar los problemas en la evaluación? ¿Cómo integrar estas ideas en una orientación constructivista de la enseñanza de las Ciencias? ¿Cómo incorporar los logros de la investigación en este campo a los manuales que se utilizan en las aulas?

Siete años después, Perales (2000) presentaba una propuesta en la que analizaba las diferentes perspectivas generadas por los modelos de investigación y los modelos didácticos. Partiendo de la premisa de que se debe contextualizar los problemas, el autor defiende la inclusión de los problemas auténticos en el *curriculum* escolar de Ciencias; pero advierte que la resolución de problemas no debería ocupar un espacio desproporcionado con respecto a las necesidades reales de enseñanza y aprendizaje, teniendo en cuenta la disciplina objeto de estudio y las características de los estudiantes y del docente. Según Perales, no hay ninguna razón para defender un *curriculum* basado exclusivamente en la resolución de problemas, como ya defendía Garret (1988, 1995).

La nueva perspectiva sobre la resolución de problemas ha abierto un espacio para la concepción de los trabajos prácticos en Ciencias como un recurso que

promueve el desarrollo de destrezas, desde las más genéricas hasta las más específicas de este tipo de actividades. Swain (1988) identifica las siguientes:

1.- reconocer y describir la naturaleza de una investigación;

2.- generar hipótesis contrastables y adecuadas a la resolución del problema;

3.- diseñar técnicas y procedimientos de resolución del problema;

4.- seleccionar un procedimiento experimental entre varios posibles;

5.- diseñar la secuencia de acciones, y aplicarla a la investigación; y

6.- contrastar las hipótesis de trabajo en función de los resultados obtenidos.

El desarrollo de este tipo de destrezas refuerza las adquisiciones que se realizan mediante otras tareas de aprendizaje, como por ejemplo la resolución de problemas teóricos. En esta línea apunta la clasificación que proponen Miguens y Garret (1991) para los problemas en el uso de los trabajos prácticos, en relación con la Ciencia, el aprendizaje, los temas pedagógicos y lo que denominan evidencia investigada. Según estos autores, los trabajos prácticos se encaminan a varios objetivos: desarrollar competencias en el trabajo científico y habilidades para la realización de una investigación, extender el conocimiento a través de nuevas experiencias, facilitar el contacto con fenómenos reales, dar la oportunidad de explorar la extensión y los límites de las teorías, y desarrollar destrezas específicas como la observación y la manipulación.

Más allá del aprendizaje de contenidos procedimentales, Caamaño (1992) analiza los objetivos de los trabajos prácticos en Ciencias en relación con los hechos, conceptos, teorías, procedimientos y actitudes que permiten poner en juego. Nosotros coincidimos con estas apreciaciones de Caamaño en la idea de que los trabajos prácticos no se limitan al desarrollo de aspectos procedimentales del conocimiento. Por otra parte, sostener lo contrario conllevaría un isomorfismo que está en evidente contradicción con la naturaleza de la Ciencia y del aprendizaje (Domínguez Castiñeiras, 2000). Ya hemos apuntado que la supuesta independencia entre teoría y práctica sólo se justifica como estrategia de análisis; pero epistemológica y psicológicamente, los ámbitos conceptual y procedimental están estrechamente interrelacionados (Pozo, 1987), y por ello no se pueden considerar independientes ni desvinculados en la experimentación de los científicos o de los estudiantes. En resumen, no hay experimentos sin contenidos conceptuales y procedimentales asociados (Pro, 1995, 1997, 1998).

Hace una década que el tema de los trabajos prácticos ha dejado de constituir un campo de investigación prioritario (Saura, 1996), y en los últimos veinte años se han sometido a arduos debates los distintos enfoques propuestos. Quizá las objeciones más destacables y con implicaciones de mayor calibre son las de Hodson (1990, 1992, 1994, 1998b). Frente a las posturas de inspiración más bien positivista,

que proponen combatir la pasividad de los estudiantes mediante la experimentación y la observación en los laboratorios, Hodson (1990, 1994, 1998a) advierte que la actividad de los alumnos no consiste en pasar muchas horas en el laboratorio, sino en construir conocimiento activamente. Además, rebate los fundamentos lógicos que se suelen utilizar para defender los trabajos de laboratorio: que aumentan la motivación, que crean actitudes adecuadas, que mejoran la adquisición de habilidades, que desarrollan el aprendizaje de los métodos de la Ciencia y de otros conocimientos científicos… aspectos para lo cual los trabajos prácticos no siempre son eficaces (Hodson, 1992). En palabras del propio Hodson: es necesaria «menos práctica y más reflexión». Las situaciones de laboratorio no son las únicas en las que se produce una construcción activa de conocimiento, y deben reconceptualizarse las actividades prácticas de tal manera que tengan presente la naturaleza y los condicionantes del aprendizaje.

En otro trabajo, Hodson (1994) llama la atención sobre la evaluación de los trabajos prácticos, insistiendo en la necesidad de ir más allá de las calificaciones objetivas, y llegar a analizar la orientación educativa. Nosotros consideramos que esta afirmación puede aplicarse también a la evaluación de otros recursos y estrategias: la valoración de un proceso de enseñanza y aprendizaje debe plantearse para algo más que para cuantificar un rendimiento académico, si no queremos caer en la sustracción de dos elementos básicos del aprendizaje de las Ciencias: la interpretación de valores y la toma de decisiones (Domínguez Castiñeiras, 2000).

En España se ha detectado otra problemática relacionada con la utilización de los trabajos prácticos en la enseñanza de las Ciencias: al analizar las prácticas de laboratorio incluidas en los libros de texto, Tamir y García (1992) concluyen que pocas muestran un nivel aceptable de los indicadores de calidad que utilizan los investigadores (nivel de indagación, inventario de habilidades e inventario de dimensiones). Dada la relevancia de los libros escolares en las instituciones educativas, esta situación es preocupante.

Sin embargo, en los últimos años parece que se está produciendo una lenta reubicación de los trabajos prácticos como actividades de plena entidad en el proceso de aprendizaje (Caamaño, 1992; Hodson, 1998b). Progresivamente se va abandonando su concepción como un mero elemento sumativo a la "parte teórica", y al mismo tiempo se reconoce que permiten abordar contenidos conceptuales y procedimentales que van más allá de los ligados a las destrezas de observación y manipulación. También se están revisando los enfoques de organización del aula para planificar estas actividades, otorgando una mayor presencia a las dinámicas grupales sin excluirse el trabajo individual.

En todo caso, consideramos que ninguna de las estrategias de enseñanza puede considerarse universal, puesto que todas dependen de los contenidos que se ponen en juego y del contexto de aprendizaje. Tampoco podemos afirmar que

existan recursos de enseñanza buenos o malos: lo que los hará más o menos adecuados en un contexto concreto será su capacidad para favorecer la construcción de conocimientos. El guía del proceso de aprendizaje es el profesor, cuya implicación es imprescindible en la selección de los materiales didácticos; pero hemos de recordar que la intencionalidad del docente no siempre coincide con la del discente, y que cualquier metodología de enseñanza está concebida para que el alumnado aprenda, no para que el profesor dé salida a un programa de contenidos.

Terminamos esta reflexión sobre los materiales de aprendizaje, exponiendo las variables que han propuesto Sanjosé *et al.* (1989, 1993) para analizar la efectividad instruccional de los problemas, ya sean de lápiz y papel o de laboratorio:

- Estructura, cohesión y organización de contenidos
- Exigencias cognitivas
- Legibilidad, estilo expositivo y lenguaje figurativo
- Cuestiones insertadas y utilización para el cambio conceptual
- Organizadores de avance y consideración de prerrequisitos
- Consideración de los conocimientos previos y posibles dificultades de aprendizaje; estrategias de estudio desarrolladas en el alumnado
- Variables metacognitivas

I.3.4. La situación actual de la enseñanza de las Ciencias

El grupo de 2º de Bachillerato que constituyó la muestra de investigación correspondió al curso académico 2008-2009, el último en el que estuvieron vigentes las enseñanzas reguladas por la LOGSE (MEC, 1990). Debido a esta extinción del antiguo plan educativo y a la inminente aplicación de la nueva reforma, adaptamos nuestras propuestas sobre Termoquímica y Termodinámica Química al nuevo modelo educativo español y europeo.

Dadas las características del contexto de la Tesis, en este apartado se incluye un breve apunte sobre la situación actual de la Química en la enseñanza secundaria (*Situación actual de las Ciencias en la enseñanza secundaria*, pág. 93), el eco que ha tenido en la Didáctica de las Ciencias la integración de las competencias en el sistema educativo (*Las competencias en esta investigación de Tesis. Definición de la competencia científica*, pág. 101) y las tendencias que han guiado en los últimos años las investigaciones en propuestas metodológicas para la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias Experimentales (*Actualidad de la investigación en Didáctica de las Ciencias*, pág. 115).

Cuando ya estaba en marcha la parte experimental de la Tesis, la literatura en Didáctica de las Ciencias comenzaba a emitir publicaciones sobre la acogida de los recientes enfoques de enseñanza y aprendizaje basados en las competencias

(VV.AA., 2009a), y en poco tiempo surgieron algunos proyectos de investigación sobre el desarrollo de la competencia científica en las aulas (por ejemplo, Blanco, España y González, 2010). Estas aportaciones nos inspiraron el diseño de un nuevo método para analizar el aprendizaje en términos de las competencias que desarrollaron los alumnos de la muestra como consecuencia de la interacción con las propuestas ensayadas. El nuevo método de análisis se expone en el apartado (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, 458), después de la descripción del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción que ya estaba planificado desde el comienzo de la investigación, y que nos ha permitido validar el nuevo método (*Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento*, pág. 456).

I.3.4.1. Situación actual de las Ciencias en la enseñanza secundaria

Como no es objetivo de esta Memoria analizar el *curriculum* de Ciencias, nos limitamos a resumir la situación de las asignaturas de Ciencias, y en particular de la Química, en el contexto de nuestro sistema educativo.

Hasta el momento en que se realizó la parte experimental de la Tesis, las últimas reformas en materia legislativa definían la Química en 2º de Bachillerato como una materia propia de la modalidad de Ciencias y Tecnología (MEC, 2007; XUGA, 2008), con la misma asignación de cuatro horas semanales que ya recogía el plan educativo anterior al vigente en 2008-2009, en el que la Química estaba vinculada a la modalidad de Ciencias de la Naturaleza y de la Salud (MEC, 2000; XUGA, 2002).

Las últimas reformas educativas han reducido significativamente el peso de las Ciencias en los programas educativos. Se advierte un drástico recorte en el horario de las materias científicas y, además, muchas de ellas se han convertido en propias de modalidad, esto es, en optativas vinculadas a determinadas orientaciones o especialidades de la enseñanza secundaria.

En las modalidades de Ciencias de Bachillerato se dedica casi un 50% del tiempo lectivo al estudio de materias ajenas a la cultura científica (Caamaño, 2003). La reciente inclusión de la materia de Ciencias para el mundo contemporáneo podría suponer el principio de un cambio efectivo en la enseñanza de las Ciencias (Pro, 2008). No obstante, la presencia curricular de las Ciencias sigue sin ser suficiente, y todavía es necesario clarificar muchas cuestiones importantes (Pro, 2009) antes de que podamos considerar que la situación de la enseñanza de las Ciencias comienza a ser menos preocupante que la actual.

La situación legislativa vigente en 2008-2009 refleja claramente la pobre consideración social que se da a la Ciencia en la sociedad actual:

Está bastante extendida la opinión de que la actividad científica aporta comodidades y avances en determinados campos de interés general, pero al mismo

tiempo se mantiene una actitud de escepticismo y desconfianza hacia la aplicación de las innovaciones y los avances científicos, de los cuales se considera que acarrean contaminación ambiental y problemas sociales (desarrollo de armamento, guerras, control político…) La Ciencia se percibe como un conocimiento hermético, inaccesible para la mayoría y capaz de generar poderosos instrumentos de opresión y destrucción masiva. En ocasiones, esta percepción negativa se traduce en un rechazo abierto del que se alimentan los movimientos anticientíficos y ciertas filosofías relativistas radicales postmodernas, que llegan a negar la validez del conocimiento científico (Vázquez, Acevedo y Manassero, 2004; Vázquez y Manassero, 2008). Con demasiada frecuencia se comprueba cómo los ciudadanos no comprenden los problemas de base científica ni participan en las controversias de la Ciencia, y su indiferencia o rechazo tiene como consecuencia directa la delegación de las decisiones sociocientíficas a favor de políticos y ciertos sectores minoritarios que son juez y parte en los temas tratados.

El alumnado desconoce en general los aspectos sociales positivos de la Ciencia y la actividad científica (Solbes, 2011), como los valores de racionalidad y espíritu crítico frente a las supersticiones, dogmas, prejuicios y estereotipos; o el compromiso de muchos científicos a favor del medioambiente, el pacifismo y la justicia social. Además, a diferencia de las Artes y las Humanidades, que gozan de un *status* generalizado de patrimonio cultural universal, las Ciencias no se valoran como una parte insustituible de la cultura. Esta situación de desprestigio social de la Ciencia parece especialmente presente en España (Jiménez Aleixandre, 2003 – capítulo introductorio), donde la mayor parte de la población no considera que los principales constructos científicos formen parte del acervo cultural, desde luego no al nivel de los artísticos o humanísticos. En este contexto social, los programas educativos de las últimas décadas no han ayudado precisamente a revertir la situación, ni en España ni en otros países (Osborne, Simon y Collins, 2003; Jenkins, 2005; Solbes, 2007; Vázquez y Manassero, 2008).

En los países desarrollados se constata una disminución gradual del interés de los jóvenes por el estudio de las Ciencias en general (y de las fisicoquímicas en particular), por la cultura científica y por la orientación personal hacia el ejercicio profesional de la Ciencia. De hecho, el número total de alumnos matriculados y graduados en carreras científicas universitarias tiende a disminuir (OCDE, 2006d). En la ESO, los alumnos tienden a evitar las materias de Ciencias y prefieren elegir otras optativas de la LOE que les resultan más accesibles porque tienen menor nivel de formalización, como Tecnología, Música o Plástica. Esta tendencia se observa también en los estudiantes que tienen la intención de cursar alguna de las modalidades científicas del Bachillerato.

Se observa un bajo interés por los temas relacionados con las disciplinas científicas. En la Unión Europea, aun valorando la Ciencia como positiva en general (Eurydice, 2011), sólo para un 54% de los estudiantes es relevante a nivel personal

(OCDE, 2006a, 2006d). Los resultados de los informes de la OCDE coinciden con los del proyecto internacional *ROSE* (*the Relevance of Science Education*), que se basa (en parte) en el Eurobarómetro e indaga en las visiones y actitudes de los alumnos de quince años hacia las Ciencias y la Tecnología, y en sus expectativas de futuro en relación con el estudio de estas asignaturas (Sjøberg y Schreiner, 2010). Los estudios de *ROSE* concluyen que en general los jóvenes evalúan negativamente las materias científicas de la enseñanza obligatoria, y las peores valoraciones se dirigen a los currículos y los libros de texto.

España no es una excepción: casi un 90% del alumnado considera que la Ciencia y la Tecnología son importantes y potencialmente buenas para el desarrollo de la sociedad, pero menos de un 50% afirma sentirse más atraído por estas asignaturas o reclama un aumento de las horas de clase de Ciencias. La tendencia al escepticismo se manifiesta en que menos de un 60% considera que los beneficios científicos son mayores que los efectos nocivos de los productos de la actividad científica. El descenso de la motivación hacia el estudio se agudiza a medida que se avanza en el nivel de enseñanza, y es más significativo en el primer ciclo de la ESO. Hacia el final de la educación obligatoria, la percepción general es más negativa en cuanto al interés personal por las Ciencias y su relación con la vida cotidiana, así como a la dificultad de su aprendizaje (Marbà-Tallada y Márquez, 2010).

Merece una mención especial la influencia de los estereotipos sexuales en la motivación de los estudiantes. En los primeros niveles de la enseñanza, mientras la valoración de las Ciencias y su estudio es alta, hay pocas diferencias de motivación en función del sexo (Archer et al, 2012). Pero a medida que avanza la escolarización, los resultados de chicos y chicas divergen más y más. En los adolescentes, según *ROSE* (Sjøberg y Schreiner, 2010), se detecta una marcada preferencia por unos temas u otros en función del sexo de los alumnos: las chicas tienen menos motivación por los contenidos científicos, y menos por los fisicoquímicos que por los biológicos. Además, manifiestan una peor concepción de sus propias capacidades y habilidades en Ciencias (ver, por ejemplo, Osborne, Simon y Colins, 2003), y tienen menores expectativas de seguir una carrera científica o de ejercer un trabajo relacionado con las Ciencias OCDE (2009a). Está claro que las experiencias educativas de las chicas son diferentes a las de los chicos (Mujtaba y Reiss, 2013). Unos y otras comparten aula, pero en la práctica todavía están ampliamente extendidos los prejuicios sexistas, tanto en la escuela como en la sociedad en general (Archer et al, 2012). Aunque en España no se detectan diferencias significativas entre los niveles de competencia científica de chicos y chicas, ni en primaria ni en secundaria (OCDE, 2006c), ellas suelen mantener actitudes más negativas hacia la Ciencia y un mayor rechazo hacia la elección de carreras y trabajos científicos (Acevedo, 2005a).

Los resultados sobre el declive de la motivación hacia las Ciencias no son nuevos, ya se pusieron de manifiesto en los años ochenta (Yager y Penick, 1986). Las

materias científicas se perciben como difíciles, aburridas, autoritarias, excesivamente teóricas, irrelevantes para la vida "real" y poco útiles; solamente las asignaturas de Música y Educación Plástica se juzgan como más inútiles que las de Ciencias. En ámbitos como la Termodinámica, esta falta de motivación se amplifica por el alto nivel de abstracción de los contenidos conceptuales y por la necesidad de movilizar destrezas avanzadas de razonamiento y demostrar una cierta habilidad en la aplicación de conocimientos matemáticos; las estrategias de dirección de aula basadas en la transmisión de información y las metodologías docentes que relegan al alumno a un ente pasivo no ayudan a combatir estas percepciones negativas (Sözbilir, 2004b).

En general, los alumnos que tienen mejores resultados en Ciencias son los que peor actitud tienen hacia ellas (Solbes, 2011), y esta tendencia se ha confirmado no solamente en Europa, como se concluye del proyecto ROSE (Acevedo, 2005a; Sjøberg y Schreiner, 2005), sino en el mundo en general, como han puesto de manifiesto *TIMSS* (Acevedo, 2005b; Mullis, 2007) y la OCDE (OCDE, 2009z).

Esta situación se agrava porque los profesores y los libros de texto no tienen en cuenta ni la valoración negativa del alumnado por las materias de Ciencias ni el abandono masivo de su estudio (Solbes *et al.*, 2007). Es más, alumnos y docentes suelen mostrar desconfianza ante los cambios metodológicos y las innovaciones en la enseñanza (Banet, 2007). Los planteamientos constructivistas no han calado en el profesorado, y desde hace casi dos décadas se observan distorsiones metodológicas significativas entre aquellos docentes que los aceptan (Duit, 1996). La mayoría de los contenidos escolares se han quedado anclados en la Ciencia del siglo XIX, y eso, con suerte, porque la historia de la Física parece acabar en Newton (Díaz y de Pro, 2003). Tampoco se suele enseñar la utilidad que tuvieron en su día estos contenidos para la resolución de los problemas sociales de su época, ni el impulso que dieron hacia el desarrollo de los conocimientos de los que disponemos actualmente para continuar resolviendo cuestiones problemáticas. En general, la educación científica genera una imagen deshumanizada de las Ciencias que no tiene en cuenta el impacto social de éstas ni los aspectos morales y éticos del trabajo científico, ni el desarrollo de la creatividad en el ejercicio de las Ciencias (Lemke, 2006).

Por otra parte, el sistema de optatividad no favorece la elección de materias calificadas como difíciles o "teóricas", y los exámenes continúan haciendo hincapié en los contenidos más tradicionales, lo que genera un círculo vicioso en la enseñanza: no se enseña lo nuevo porque no se evalúa… y no se evalúa porque no se enseña (Solbes, 2011).

Recordemos que los procesos de enseñanza y aprendizaje tienen lugar en un marco social, histórico e institucional, así que las soluciones a los problemas educativos no solamente deben buscarse dentro de los muros de la escuela (Carabaña, 2008). La manera en la que se imparten las materias de Ciencias no es el

único factor en los orígenes de esta preocupante situación (Rocard *et al.*, 2007): se trata de un fenómeno complejo en el que se involucran más variables (Solbes *et al.*, 2007), y no todas son internas a la enseñanza, aunque las innovaciones que incluyen las reformas no siempre se aplican en la práctica (Guisasola, 2008). También tienen incidencia negativa en las actitudes hacia la Ciencia y su aprendizaje ciertos comportamientos de otros sectores sociales, como el hermetismo de la comunidad científica o la utilización, por parte de los medios de comunicación, de los estereotipos y mitos epistemológicos contrarios a la valoración social de la Ciencia y de los científicos. El analfabetismo científico de la sociedad es a la vez causa y consecuencia de la falta de motivación por las Ciencias y por su enseñanza, en un círculo vicioso creado entre las actitudes negativas cultivadas a lo largo de la escolaridad, que alimentan el desconocimiento, y el desconocimiento, que a su vez tiende a generar actitudes negativas (Acevedo, Vázquez y Manassero, 2004; Acevedo, 2005a; Sjøberg y Schreiner, 2005).

En este contexto, el profesorado trabaja con adolescentes que en general tienen un escaso bagaje de conocimientos teóricos y procedimentales, que están poco interesados y motivados por las Ciencias y su enseñanza, que en muchos casos demuestran mal comportamiento en clase, que han interiorizado una escala de valores en la cual se desatienden o rechazan la cultura y el interés por el conocimiento… Como las reformas educativas apenas repercuten en la realidad de las aulas, los docentes tienden a rendirse y participar de una farsa en la que no incorporan las innovaciones, pero sí los nuevos términos propuestos, y elaboran documentos burocráticos con "lo que hay que decir" (López Gay, 2010). Por otra parte, existe una "incredulidad patológica" (Díaz y de Pro, 2003) del sistema en el propio sistema: curso tras curso, el alumnado se ve obligado a trabajar de la misma manera sobre los mismos contenidos, porque se presume que el aprendizaje no tuvo lugar; por tanto, se desconfía de cómo fueron enseñados los contenidos.

Desde las altas esferas de la política europea se observa una creciente preocupación por el rechazo masivo de la sociedad, y en particular de los jóvenes, hacia las Ciencias y la actividad científica. Por ejemplo, el informe Rocard (Rocard *et al.*, 2007) advierte que la disminución en el número de estudiantes que optan por carreras profesionales de Ciencias es un «peligro capital para el futuro de Europa». En la revista Alambique se encuentra un resumen de este informe traducido al español (Rocard *et al.*, 2008).

En los distintos países de la Unión Europea se ha puesto en marcha un proceso de convergencia en materia de educación y formación, que se traduce en el establecimiento de unos objetivos comunes a corto y medio plazo, y en la modificación de los sistemas de educación y formación europeos con el propósito de afrontar los nuevos retos de la conocida como "sociedad del conocimiento". Es innegable que esta nueva reforma responde ante todo al empeño de la Unión Europea de transformar la economía de Europa en "una economía más competitiva

y dinámica"; por este motivo, la UE se marcó como objetivo para el año 2010 incrementar el número de titulados en Ciencia e Ingeniería (UE, 2004).

Las nuevas proposiciones sobre los objetivos a los que debe aspirar la educación en la "sociedad del conocimiento" parecen converger hacia el concepto de competencia (Rychen y Salganik, 2003; OCDE, 2000a; Pro, 2008b), que se desarrolló en torno a los años 60 en el ámbito empresarial (Solbes *et al.*, 2013). En su origen, la competencia se refiere a la cualificación y el desempeño de la mano de obra (Bybee y Fuchs, 2006), en clara relación con el concepto económico de competitividad.

Ahora que se ha cumplido la primera década del siglo XXI, el concepto de competencia ha salido ya de la órbita de acción política y económica y ha entrado de lleno en el mundo de la investigación y la innovación educativa, desatando un interesante debate sobre la naturaleza y las implicaciones para la enseñanza que tiene el enfoque por competencias en la nueva reforma curricular.

En el momento en que diseñamos nuestro análisis del aprendizaje por competencias, los resultados de las pruebas PISA (2003b, 2006b, 2009b) atraían una atención creciente en la comunidad educativa e investigadora, pero todavía no había muchas publicaciones al respecto en la literatura del área. No debe olvidarse, además, que se trata de investigaciones de muy reciente aparición, que todavía se encuentran en una fase temprana de su desarrollo, en pleno debate para llegar a un consenso sobre las bases teóricas de la competencia. Por todas estas razones, aquí solamente se sintetizan aquellas contribuciones teóricas que han influido en el diseño del análisis del aprendizaje por competencias que se presenta en esta Memoria, cuyos fundamentos se justifican en resultados y conclusiones que ya han demostrado su validez en el área.

Al entrar a analizar el tema de las competencias científicas, no se puede obviar la polémica sobre el origen del término competencia y sobre los objetivos con los que se introdujo en las reformas curriculares. Su significado parece todavía falto de consenso (Escudero, 2007; Pro, 2007, 2008a, VV.AA., 2009), y desde hace unos años se le han atribuido múltiples acepciones. Escudero (2007), que expone las más relevantes, ubica explícitamente los orígenes del término en la doctrina conductista y el movimiento social por la eficiencia.

Al rastrear la genealogía de las competencias en los textos que tratan la convergencia europea en materia de educación, nos encontramos con el concepto de competencia clave, que partió de las recomendaciones del Consejo Europeo de Lisboa de marzo de 2000 (U.E., 2000). Sobre esta base, en 2001 se creó el *Grupo de trabajo sobre las capacidades básicas* (www.europa.eu, 2010), el cual desarrolló el marco teórico de las competencias clave. De acuerdo con las publicaciones de este grupo y del Consejo Europeo, la necesidad de desarrollar las competencias clave nació de la creciente y cambiante demanda de conocimientos, capacidades y actitudes que, a

juicio de las altas instancias europeas, se requieren de la ciudadanía para desarrollar la "sociedad del conocimiento".

Desde el año 2000, diversos proyectos internacionales hacen referencia a la necesidad de seleccionar y desarrollar competencias clave. En este sentido, cabe destacar el *DeSeCo* o *Definición y Selección de Competencias* (Rychen y Salganik, 2003), además del documento anexo de la Recomendación 2006, "Competencias clave para el aprendizaje permanente - un marco de referencia europeo" (U.E., 2006b), versión revisada del marco desarrollado por el citado *Grupo de trabajo*.

En estos proyectos, la formación se concibe como un proceso continuo que se desarrolla durante toda la vida del individuo, y se considera que los gobiernos deben aprovechar los recursos humanos disponibles, facilitar su formación permanente y adaptarla para hacer frente a los problemas económicos y sociales de la Unión Europea. Los rápidos y frecuentes cambios que se producen en la estructura, composición, intereses y preocupaciones de la sociedad hacen necesario el reajuste del mercado laboral y las estrategias de organización empresarial. Con esta finalidad, el Parlamento y el Consejo Europeo propusieron, entre 2005 y 2006, adoptar una herramienta de referencia para el desarrollo y la adaptación «de los conocimientos, las capacidades y las actitudes de la mano de obra», los cuales «constituyen un factor fundamental para la innovación, la productividad y la competitividad», y «contribuyen a la motivación y la satisfacción profesional de los trabajadores y a la calidad del trabajo en Europa» (U.E., 2005, 2006a).

Las expresiones que aparecen entrecomilladas en el párrafo anterior son extractos literales de las "Recomendaciones del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las competencias clave para el aprendizaje permanente", en sus ediciones de marzo de 2005 y diciembre de 2006. En el texto de 2005, se proponía a los legisladores en materia educativa la herramienta que denominaron «competencias clave necesarias para la plena realización personal, la cohesión social y la empleabilidad en una sociedad del conocimiento» (U.E., 2005). En el posterior Consejo Europeo, de diciembre de 2006 (U.E., 2006a), se reafirmó el concepto de competencias clave y se añadieron recomendaciones para facilitar y promover la reforma que adoptarían en breve los gobiernos de los Estados miembros.

Coincidimos con Pro (2007) en su inquietud al comprobar que las altas instancias europeas se expresan en semejantes términos en un texto que pretende dar a las competencias un sentido que permita incluirlas en las reformas educativas. Es cierto que la redefinición de las orientaciones escolares huye de los *tradicionales* saberes académicos en busca de nuevos mecanismos y herramientas con los que dar respuesta a los nuevos cambios sociales (Solbes *et al.*, 2013), pero esta perspectiva que se propone desde Europa supone plegar la educación a las exigencias socioeconómicas del mercado, apurado por su actual necesidad de adaptación y reforma de los sistemas educativos.

Pero el profesorado puede adoptar muchas decisiones sobre este tema, y las competencias subrayan la puesta en práctica de los saberes, con lo que ofrecen una oportunidad para mejorar las clases de Ciencias (Jiménez Aleixandre, 2009). Además, no se debe confundir las competencias básicas con las competencias profesionales (Pro, 2007). Nuestro concepto de competencia es completamente distinto al de competencia clave que acabamos de exponer: desde nuestro punto de vista del constructivismo social, el objetivo no es que la formación de los alumnos se adapte a los nuevos contextos laborales y tecnológicos, sino que, de acuerdo con el marco teórico referencial que venimos exponiendo a lo largo de este ***Capítulo I***, los estudiantes adquieran unos conocimientos científicos que les resulten útiles para actuar ante las distintas situaciones de su vida personal y social, y para adaptar las circunstancias a sus necesidades e intereses. Consideramos que la enseñanza debe servir para lograr una alfabetización científica con la que el conjunto de la población puede analizar en profundidad los problemas sociocientíficos que le afectan (Norris y Phillips, 1994; Vilches, Solbes y Gil, 2004), y actuar en consecuencia sobre la base de los conocimientos científicos, que son sin duda una de las mejores herramientas en la evolución de las sociedades humanas. La formación científica debe lograrse durante la enseñanza obligatoria, independientemente de que el alumnado continúe o no con estudios científicos superiores, porque la alfabetización científica se relaciona con la capacidad de pensar, y más en un escenario en el que la vida de todos está influida por la Ciencia y la Tecnología (Gil y Vilches, 2006).

En nuestro contexto histórico y social de principios del siglo XXI, el desarrollo de la Ciencia ya permite solucionar con un éxito más que razonable los principales problemas a los que se enfrenta la humanidad. A diferencia de lo que sucedía en el pasado, las dificultades ya no están en las lagunas de la Ciencia, sino en obstáculos sociales y económicos que hemos heredado. Como prueba, basta pensar en la elevadísima mortandad que ocasionan las periódicas hambrunas en ciertas zonas del planeta, cuando estamos en un momento científico y tecnológico en el que ya es un hecho la disponibilidad de métodos de producción que garantizan una alimentación adecuada a más habitantes de los que alberga la Tierra.

Desde diversos organismos internacionales se insiste en que las grandes cuestiones actuales nos obligan a adoptar nuevas estrategias y modelos para la vida civil, tanto a nivel individual como colectivo, y que estas estrategias y modelos deben estar basados en el pensamiento científico (UNESCO, 1999; OCDE, 2005). En esta tesitura, consideramos que la resolución de los grandes retos del siglo XXI necesita de la alfabetización científica. Las bases teóricas y procedimentales que los estudiantes construyan en su aprendizaje, junto con los valores y las actitudes que aporten una imagen actualizada de la Ciencia y de la actividad científica, son una parte importante de los conocimientos que capacitarán al conjunto de la población para adoptar las decisiones que considere adecuadas sobre cualquier cuestión a la que el conocimiento científico pueda dar respuesta hoy y en el futuro.

En este sentido, estamos más cerca de la definición de competencia que recoge el marco teórico PISA (OCDE, 2006a), cuyo enfoque se refiere al ejercicio de los individuos como ciudadanos activos, responsables, reflexivos y con sentido crítico y compromiso en la toma de decisiones personales y sociales.

En el apartado siguiente, se reformula el concepto de competencia de acuerdo con el enfoque que nos parece más adecuado desde nuestra perspectiva de investigación educativa. Para ello, se rescata la concepción del aprendizaje procedente del marco teórico PISA (OCDE, 2006a y c) y de la Ley Orgánica de Educación (MEC, 2006a), vigente en España en el momento en que se realizó la intervención. De aquí surge el concepto de competencia científica que hemos utilizado en nuestro método de análisis del aprendizaje (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, 458).

I.3.4.2. Las competencias en esta investigación de Tesis. Definición de la competencia científica

Partiendo de la contextualización que hemos realizado en los apartados anteriores, se formula el concepto de competencia según el enfoque que nos parece más adecuado desde nuestra perspectiva de investigación educativa. Nuestra definición de la competencia procede del marco teórico de PISA (OCDE, 2006a) y recoge las recomendaciones de la LOE (MEC, 2006a), que estaba vigente en España en el momento en que se realizó la intervención en el aula. A partir de las posibles implicaciones que tiene la introducción de las competencias en la enseñanza de las Ciencias, concretamos el concepto de competencia científica que se define en nuestro análisis del aprendizaje por competencias (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, 458).

Antes de presentar las definiciones de competencia que se proponen desde los textos europeos (OCDE, 2005; PISA, 2006a), en España (MEC, 2006a; 2006b) y en concreto en Galicia (XUGA, 2007), haremos un breve comentario sobre la etimología de la palabra competencia. Procede del sustantivo latino *competentia* y tiene relación con los verbos competer y competir, cada uno de los cuales le aporta un significado diferente:

El verbo competer, que proviene del latino *competere*, tiene por significado concordar o corresponder. Así, el sustantivo competencia puede referirse a la capacidad de algo o alguien en la realización de alguna tarea o cometido, o a la incumbencia o atribución de una persona o entidad para realizar alguna actuación que le corresponde o le es asignada.

La relación con el verbo competir aporta un significado muy diferente al sustantivo competencia: competir deriva del vocablo *competere*, compuesto de la partícula *cum* (con) y del verbo *petere* (demandar), y por lo tanto expresa la acción de esforzarse, pugnar o luchar por alcanzar una meta o aspiración.

De entre las definiciones de competencia del diccionario de la RAE (2008), la que mejor se ajusta a nuestros fines es: pericia, aptitud o idoneidad para hacer algo o intervenir en un asunto determinado. Para María Moliner (2007), alguien competente es conocedor, experto o apto un una ciencia o materia.

Si concretamos esta definición para los términos en los que definimos el aprendizaje, la competencia se convierte en el conjunto de capacidades que permiten saber, saber hacer, ser y vivir con otros en situaciones de la vida en las cuales se ha de decidir cómo actuar (Chamizo e Izquierdo (2007).

Hay diferencias semánticas notables entre la definición de las competencias clave (UE, 2005) y la de competencias básicas que propone PISA (OCDE, 2006a). Así, la OCDE (2005) define las competencias como sigue:

«Competencia es la combinación de destrezas, conocimientos y actitudes que posee una persona, y que son adecuados para una determinada situación.»

«Competencias clave son aquellas competencias en las que se sustentan la realización personal, la inclusión social, la ciudadanía activa y el empleo.»

Las competencias clave recogen y desarrollan la noción de las cualificaciones propuestas por el Consejo de Lisboa, entre las cuales se engloban las capacidades de leer, escribir y realizar las operaciones de la aritmética elemental, las capacidades mínimas a desarrollar en materia de TIC y el espíritu empresarial. Se refieren a la movilización, la aplicación y la transferencia de conocimientos, destrezas y actitudes para comprender y analizar situaciones, y resolver problemas. El enfoque teórico de las competencias clave es económico y profesional, porque con ellas se pretende valorar si las personas se encuentran capacitadas para su incorporación a la vida laboral, y adaptadas a la integración en una sociedad en continuo cambio.

En cambio, PISA defiende un concepto de competencia y una perspectiva de análisis del aprendizaje por competencias que converge más hacia la línea de las teorías actuales sobre los objetivos a los que debe aspirar la educación en Ciencias, porque trata de determinar sobre todo si las personas se encuentran preparadas para desarrollar un papel activo en la sociedad de la que forman parte.

PISA (*Programme for International Student Assessment*, o Programa para la evaluación internacional de los alumnos) fue ideado en 1997 en el seno de la OCDE. No se concibió como un proyecto de investigación, sino como un estudio periódico cuyos resultados sirvieran de base para definir y formular políticas educativas de medio y largo alcance en los países involucrados (ver www.oecd.org). La OCDE se planteó la necesidad de generar nuevos indicadores del rendimiento educativo de manera que los resultados aportasen datos con los que comparar los rendimientos de los adolescentes de 15 años dentro de la escena internacional formada por los países miembros de la OCDE y un número creciente de países asociados. Este enfoque ha dotado de gran reconocimiento internacional al proyecto PISA, hasta el

punto de que sus informes se han convertido en una referencia de evaluación educativa a nivel mundial (OCDE, 2006a).

La definición que se recoge en el proyecto PISA para las competencias es la siguiente (OCDE, 2006a):

«Las competencias básicas son aquel conjunto de los conocimientos, las habilidades, la pericia y las aptitudes de los estudiantes para analizar y resolver problemas, para manejar información y para enfrentar situaciones que se les presentarán en la vida adulta y que requerirán de tales habilidades. […] En el concepto de competencia se incluyen, pues, las actitudes y los valores.»

Este concepto de competencia básica se aplicó por primera vez en la convocatoria de evaluación PISA 2000 (OCDE, 2000a), y se ha venido utilizando en los trienios siguientes como indicador del rendimiento educativo en las áreas que se consideran fundamentales para la formación de los ciudadanos. El modelo de evaluación de las competencias básicas surge con el objetivo de identificar y estimar el grado de desarrollo de ciertas capacidades, habilidades y aptitudes que, en conjunto, permiten a una persona manejar y evaluar información, y con ello analizar y resolver problemas. Así, PISA evalúa la pericia y el grado de preparación de los jóvenes de 15 años para la vida adulta, y trata de estimar hasta qué punto los distintos sistemas educativos tienen éxito en la formación de personas dotadas de conocimientos, destrezas y actitudes que los capaciten para ejercer como ciudadanos activos, responsables, reflexivos y con un sentido crítico y comprometido en la toma de decisiones a nivel personal y social (OCDE, 2006a; ver también "El programa PISA de la OCDE. Qué es y para qué sirve", en www.oecd.org).

En el marco del proyecto de convergencia entre los sistemas educativos de los países de la UE, España incorpora las competencias desde 2006, con el objetivo de potenciar los aprendizajes que al finalizar la enseñanza obligatoria capacitan a los alumnos para lograr su realización personal y ejercer la ciudadanía activa en los distintos ámbitos de la vida social, a través de la posibilidad de continuar aprendiendo a lo largo de la vida, aplicando lo que aprenden, evaluando sus opciones y tomando decisiones. Para lograr este objetivo, se requiere que comprendan y utilicen conocimientos científicos de diferentes disciplinas, y la inclusión de las competencias como elemento curricular tiene por finalidad orientar la enseñanza y ayudar a los estudiantes a integrar sus aprendizajes y utilizarlos de manera efectiva cuando les resulten necesarios en distintas situaciones y contextos.

Las recomendaciones de la UE se reflejan en la LOE (MEC, 2006a), cuyo título preliminar programa la inclusión de ocho competencias básicas como eje vertebrador del nuevo *curriculum*. Las competencias básicas vienen desarrolladas en el R.D. 1631/2006 (MEC, 2006b), por el que se establecen las enseñanzas mínimas correspondientes a la ESO, y se definen como aquellos aprendizajes que todo alumno debe haber desarrollado al finalizar la enseñanza obligatoria:

«Las competencias básicas permiten identificar aquellos aprendizajes que se consideran imprescindibles desde un planteamiento integrador y orientado a la aplicación de los saberes adquiridos.»

«Su logro deberá capacitar a los alumnos y alumnas para su realización personal, el ejercicio de la ciudadanía activa, la incorporación satisfactoria a la vida adulta y el desarrollo de un aprendizaje permanente a lo largo de la vida.» (…)

«La incorporación de competencias básicas al currículo permite poner el acento en aquellos aprendizajes que se consideran imprescindibles, desde un planteamiento integrador y orientado a la aplicación de los saberes adquiridos. […] Son aquellas competencias que debe haber desarrollado un joven o una joven al finalizar la enseñanza obligatoria para poder lograr su realización personal, ejercer la ciudadanía activa, incorporarse a la vida adulta de manera satisfactoria y ser capaz de desarrollar un aprendizaje permanente a lo largo de la vida.»

En el *curriculum* gallego se recoge una definición más concreta de este concepto de competencia básica (XUGA, 2007):

«Una posible definición de competencia básica podría ser la capacidad de poner en práctica de forma integrada en contextos y situaciones diversos los conocimientos, las habilidades y las actitudes personales adquiridas. El concepto de competencia incluye tanto los saberes como las habilidades y las actitudes y va más allá del saber y del saber hacer, incluyendo el saber ser o estar.»

En la *Tabla 2* (ver página siguiente) se ofrece un listado comparativo donde se observa la correspondencia entre las competencias clave y las competencias básicas que se han establecido, respectivamente, en el marco de referencia del Parlamento y el Consejo de Europa en 2006 (U.E., 2006a), y las disposiciones legislativas que desarrolla la LOE (MEC, 2006b). El proyecto PISA, por su parte, abarca tres grandes áreas de análisis, cada una de las cuales se corresponde con una competencia básica: la competencia lectora, la competencia matemática y la competencia científica.

Mientras que desde la UE se define la competencia científica como una de las integrantes de la "competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología" (UE, 2006a), PISA 2006 (OCDE, 2006a) la concibe como una de las tres competencias básicas, imprescindibles para que los individuos ejerzan la ciudadanía activa, crítica y reflexiva. Entre las ocho competencias básicas identificadas en el *curriculum* español (MEC, 2007), aunque se reconoce que la competencia matemática está estrechamente asociada al aprendizaje de las Ciencias, ambas están separadas, en lo que a algunos autores les parece algo más que una diferencia terminológica o anecdótica (Cañas, Martín y Nieda, 2007). Aquí nos centraremos en el análisis de la competencia en el conocimiento e interacción con el mundo físico, que podemos considerar correspondiente hasta cierto punto a la competencia científica definida

por el marco teórico PISA, puesto que las capacidades que se requieren para su desarrollo son idénticas en PISA y la LOE, como apuntan los autores que han tratado esta cuestión (Cañas, Martín y Nieda, 2007).

Tabla 2 listado de las competencias clave del Parlamento y el Consejo europeos, y de las competencias básicas del curriculum español correspondiente al desarrollo de la LOE

Competencias clave para el aprendizaje permanente (UE, 2006a)	Competencias básicas según el *curriculum* español (MEC, 2006b)
1. Comunicación en la lengua materna 2. Comunicación en lenguas extranjeras	1. Competencia en comunicación lingüística
3. Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología	2. Competencia matemática 3. Competencia en el conocimiento y la interacción con el mundo físico
4. Competencia digital	4. Tratamiento de la información y competencia digital
5. Aprender a aprender	7. Competencia para aprender a aprender
6. Competencias interpersonales, interculturales y sociales, y competencia cívica 7. Espíritu de empresa	5. Competencia social y ciudadana 8. Autonomía e iniciativa personal
8. Expresión cultural	6. Competencia cultural y artística

A continuación se establece la relación entre la competencia científica y diversos aspectos del marco teórico en Didáctica de las Ciencias a los que nos hemos referido a lo largo de este capítulo, que nos han servido de directrices para reestructurar el concepto de competencia científica partiendo de las competencias que recoge el marco teórico de PISA 2006 (OCDE, 2006a). Ésta es la fundamentación teórica de nuestro análisis del aprendizaje por competencias, cuyo diseño y desarrollo se describe con detalle en el ***Capítulo II*** (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, 458).

Desde sus inicios en 2000, cada tres años el estudio PISA evalúa los rendimientos de los alumnos en las competencias lectora, matemática y científica, de tal manera que en cada edición se otorga una especial relevancia a una de las tres. PISA 2000 se centró en la competencia lectora (OCDE, 2000a, 2000b); PISA 2003 tuvo por principal la competencia matemática (OCDE, 2003a, 2003b)y PISA 2006 trató como área fundamental de evaluación la de la competencia científica (OCDE, 2006a, 2006b). En 2009 (OCDE, 2009a, 2009b), la competencia lectora volvió a ser el foco de atención, y fue en este año cuando diseñamos el análisis del aprendizaje por competencias que hemos utilizado para evaluar las dos propuestas didácticas ensayadas en esta investigación.

En el área de Ciencias, PISA 2000 (OCDE, 2002) no aludía explícitamente a la competencia científica, sino que hablaba de "formación científica". El marco teórico de PISA 2003 (OCDE, 2004) enfatizó más en la aplicación de los conocimientos conceptuales y los procesos a distintas situaciones o contextos. En 2006 se desarrolló la disposición o actitud del alumnado hacia el conocimiento científico y las pruebas de evaluación (OCDE, 2006a y c).

De las distintas definiciones de competencia científica que recogen los sucesivos marcos teóricos (OCDE, 2000a; 2003a; 2006a), la definición más completa y que consideramos más adecuada a las finalidades de nuestra investigación es la que ofrece PISA 2006, formulada en los siguientes términos:

«La competencia científica es la capacidad de utilizar el conocimiento y los procesos científicos para comprender el mundo natural y para intervenir en la toma de decisiones que lo afectan.»

En adelante se utiliza en esta Memoria la expresión "competencia científica" para referirnos a esta competencia básica, que hemos tomado como referencia en nuestra evaluación del aprendizaje.

Aunque existen bastantes conexiones y similitudes entre la competencia científica de PISA 2006 y la competencia en el conocimiento y la interacción con el mundo físico del *curriculum* español, hay diferencias entre ellas, y desde la investigación en Didáctica de las Ciencias ya se han realizado comparaciones para comprobar cuál tiene más riqueza conceptual para guiar la práctica docente (Cañas, Martín-Díaz y Nieda, 2007). La Ley Orgánica de Educación presenta ciertas deficiencias en los contenidos sobre las Ciencias y en las capacidades que se consideran necesarias para el aprendizaje de la Ciencia: reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia (y diferenciar el conocimiento científico de otras formas de conocimiento), reconocer descripciones, explicaciones y predicciones científicas, argumentar a favor y en contra de las conclusiones e identificar los supuestos, las pruebas y los razonamientos en la obtención de éstas. En cambio, PISA no refuerza aspectos como la construcción social del conocimiento científico o la importancia social de la Ciencia y las actitudes de responsabilidad sobre uno mismo, los recursos y el entorno, a pesar de que se incide más en la utilización de los conocimientos en los contextos cotidianos y en la funcionalidad del aprendizaje (Cañas, Martín-Díaz y Nieda, 2007, 2008, 2009). Si se atiende a la coherencia de la LOE entre la declaración de intenciones (la definición de competencia) y los demás elementos curriculares, se observan desajustes que suponen una inserción forzada de las competencias en un *curriculum* que apenas ha cambiado sus objetivos, contenidos y criterios de evaluación (Pedrinaci, 2012). La LOE ha incluido las competencias como referentes, pero no las ha integrado de manera explícita y clara (Pro, 2007). El cambio de *curriculum* no es condición suficiente para que se produzca un cambio efectivo en la enseñanza (Gutiérrez, Gómez Crespo y Martín-Díaz, 2008).

El diseño curricular del área científica según la LOE cumple unos objetivos distintos de los que se pretenden en el programa PISA; pero el carácter operativo y funcional de la concreción de éste puede ayudar a entender y enriquecer el concepto de la competencia científica de la LOE, y por este motivo es una referencia útil para la práctica docente (Cañas, Martín-Díaz y Nieda, 2007).

De la adaptación de las directrices europeas al contexto español, la definición de la competencia en el conocimiento y la interacción con el mundo físico aparece en el R.D. 1631/2006 (MEC, 2006b):

[La competencia en el conocimiento y la interacción con el mundo físico] «es la habilidad para interactuar con el mundo físico, tanto en sus aspectos naturales como en los generados por la acción humana, de tal modo que se posibilita la comprensión de sucesos, la predicción de consecuencias y la actividad dirigida a la mejora y preservación de las condiciones de vida propia, de las demás personas y del resto de los seres vivos. En definitiva, incorpora habilidades para desenvolverse adecuadamente, con autonomía e iniciativa personal en ámbitos de la vida y del conocimiento muy diversos (salud, actividad productiva, consumo, ciencia, procesos tecnológicos, etc.) y para interpretar el mundo, lo que exige la aplicación de los conceptos y principios básicos que permiten el análisis de los fenómenos desde los diferentes campos de conocimiento científico involucrados.»

Consideramos que la competencia es algo más que una mera cuestión de cambio terminológico (Jiménez Aleixandre y Gallástegui Otero, 2008b), porque de su definición podemos extraer varias implicaciones en las cuales se encierran las novedades que puede aportar a la enseñanza de las Ciencias:

La introducción de las competencias en el *curriculum* como aprendizajes imprescindibles supone un refuerzo en la integración de los saberes conceptuales, las destrezas y las actitudes.

En este sentido, un enfoque del aprendizaje de las Ciencias desde la óptica de las competencias supone un rechazo a la "mera reproducción del conocimiento científico que caracteriza la enseñanza escolar" (OCDE, 2006a); la enseñanza escolar tradicional, cabría puntualizar. Forman parte de la competencia científica aspectos como la percepción adecuada del espacio físico; el desarrollo y la ampliación del pensamiento científico teórico para interpretar la información que se recibe y para predecir y tomar decisiones con iniciativa y autonomía personal; la puesta en práctica de procesos y actitudes propias del análisis sistemático y de la indagación científica; el espíritu crítico en la observación de la realidad; la disposición favorable a una vida mental y física saludable, y la importancia de la conservación de los recursos y la diversidad natural. Por ello, las competencias exigen un cambio profundo en la forma de plantear los contenidos, en el enfoque y la planificación de las actividades y en la formación del profesorado (Pro, 2007).

Al enfatizar en el desarrollo de un conocimiento útil y funcional de la ciencia escolar, las competencias subrayan temas tan relevantes como la resolución de problemas de carácter científico, la identificación y el uso de pruebas en apoyo a argumentos científicos (Márquez, 2009; Jiménez Aleixandre, 2010, *passim*) y la movilización de aspectos cognitivos y afectivos en la toma de decisiones científicamente fundamentadas. Las interrelaciones entre estos aspectos pueden ponerse de manifiesto mediante la argumentación, que es útil para demostrar, por ejemplo, que los intereses personales y sociales influyen en el análisis y la interpretación de pruebas (Jiménez Aleixandre y Gallástegui Otero, 2011).

En cuanto a los aspectos actitudinales, las competencias destacan la disposición del alumnado para comprometerse con las cuestiones personales y sociales de base científica, lo que conlleva componentes motivacionales, éticos, sociales y conductuales, como, por ejemplo, la curiosidad, el espíritu de indagación, el escepticismo, la predisposición al diálogo y la negociación de significados, la responsabilidad social y el pensamiento crítico (Solbes y Torres, 2012). Éste último incluye aspectos relacionados con el uso de pruebas, el juicio basado en criterios, la capacidad para formar y sostener opiniones propias e independientes y la disposición escéptica ante opiniones no fundamentadas. Las manifestaciones del pensamiento crítico se basan en la racionalidad crítica, vinculada a la práctica de las destrezas cognitivas de razonamiento y argumentación. En Ciencias, el cuestionamiento de la autoridad o de las opiniones dominantes no ha de basarse en un rechazo o falta de atención a las ideas de los otros, sino que surge como resultado de una evaluación de ideas basada en el pensamiento racional. En este sentido, el planteamiento de cuestiones sociocientíficas permite sopesar en el aula escenarios alternativos y desarrollar el razonamiento y argumentación como destrezas que permiten generar y evaluar afirmaciones de conocimiento relacionadas con problemas relevantes para la vida personal y social.

Las competencias aportan un interesante instrumento para la renovación de la *praxis* docente y curricular en un panorama mundial de creciente complejidad en el que, cada vez más, los ciudadanos deben adoptar iniciativas basándose en informaciones (datos y pruebas) relacionadas con ámbitos muy diversos (Sadler, 2004). El enfoque del aprendizaje por competencias subraya la toma de decisiones sobre problemas sociocientíficos (Sadler y Zeidler (2009), es decir, dilemas sociales en los que la Ciencia se implica como consecuencia de su naturaleza de constructo humano al servicio de la sociedad. La controversia asociada a los problemas sociocientíficos se manifiesta mediante el debate entre opiniones diferentes sobre una determinada situación relacionada con aspectos éticos, sociológicos, políticos, económicos o medioambientales. La resolución de problemas sociocientíficos en el aula ayuda a los alumnos a comprender la naturaleza de la Ciencia y su papel en la resolución de cuestiones problemáticas y en la generación y planteamiento de nuevas preguntas y afirmaciones de conocimiento; a identificar qué tipo de

cuestiones pueden responderse o es deseable responder desde la perspectiva científica, teniendo en cuenta los aspectos éticos; a construir una imagen más real y humana de la actividad científica; y a ampliar y poner en juego los conocimientos científicos para decidir entre distintas soluciones posibles, lo que es fundamental para formar una sociedad responsable y democrática.

La introducción de las competencias no solamente pone énfasis en la transferencia de lo aprendido a otros contextos y en la toma de decisiones: también pretende que los alumnos desarrollen autonomía para aprender y autorregular sus dificultades y errores en interacción con los demás (Sanmartí, 2007), lo que integra la variable metacognitiva del aprendizaje. Ésta es una oportunidad para que se abandone la concepción academicista que valora la reproducción del conocimiento y no su transferencia a situaciones (Harlen, 2002; Hernández, 2006), y para que se supere la fragmentación y las dificultades en la transferencia de conocimiento que se han detectado desde la comunidad investigadora (Duschl y Grandy, 2008; Bravo, Puig y Jiménez-Aleixandre (2009).

Aunque la competencia no aporta grandes innovaciones a las teorías sobre los procesos de enseñanza y aprendizaje, permite relacionar entre sí diversos aspectos de la enseñanza de las Ciencias que se pueden articular a partir del concepto de competencia científica (OCDE, 2006a):

- ***Los objetivos y las metas de la educación en Ciencias***: la competencia científica connota la gran amplitud de conocimientos y el carácter aplicado de los mismos, rasgos de la educación en Ciencias (ver VV.AA., 2009b). En este sentido, el enfoque del aprendizaje por competencias es coherente con las teorías actuales sobre los objetivos a los que debe aspirar la educación científica, y representa las metas aplicables a todos los estudiantes.
- ***Los conocimientos deseables de la ciencia escolar***: la competencia científica se estructura en un *continuum* que engloba tanto el conocimiento como las habilidades y capacidades científicas asociadas a la investigación. En este sentido, la competencia científica cubre las finalidades de la ciencia escolar, tal como las hemos enunciado en (*Figura 4*, pág. 26): un conocimiento adecuado de las Ciencias incluye la comprensión y asimilación de los conceptos y explicaciones científicas, y de los aspectos procedimentales de la Ciencia, sobre todo el enfoque científico y los procedimientos asociados a la investigación; e incluye también la adopción y el desarrollo de una actitud crítica y un enfoque reflexivo, que destaque las aportaciones de la Ciencia a la sociedad y tenga presente las limitaciones que han de superarse.
- ***La necesaria perspectiva integradora de los distintos campos del conocimiento humano***: El carácter integrador de la competencia no separa tipos de contenidos, ni la educación formal de la no formal, ni las viejas disciplinas de las nuevas (Pro, 2007). Las distintas competencias forman un

> entramado en el cual se conectan entre sí de manera versátil y flexible, y la movilización de una tiende a llamar a la de cualquiera de las otras (OCDE, 2006a). Por ejemplo, los alumnos que ponen en práctica la competencia científica recurren a la competencia lectora cuando describen e interpretan un hecho, situación o fenómeno con un lenguaje caracterizado por la precisión y desambiguación de la terminología científica; y recurren a la competencia matemática para transformar, representar o interpretar datos científicos. De esta manera, las competencias básicas son un referente para realizar un planteamiento integrador del proceso de aprendizaje orientado a la aplicación de los saberes adquiridos. El desarrollo de cualquier competencia, por ejemplo la científica, puede contribuir al de las demás (Nieda, Cañas y Martín, 2012), y debe hacerlo (Pro, 2012), sobre todo en lo que se refiere a las competencias en comunicación lingüística, aprender a aprender, matemática, y social y ciudadana. Todas las materias de estudio deben contribuir al desarrollo de las competencias, y éstas se alcanzan como consecuencia del aprendizaje realizado en las distintas materias, de una forma conjunta e interdisciplinar (Furió, Hernández *et al.*, 2007).

Su estructura y su capacidad integradora y multidimensional convierten la competencia científica en un instrumento adecuado para responder a la pregunta clave formulada en la edición PISA 2006 (OCDE, 2006a): «¿Qué es importante que sepan, valoren y sean capaces de realizar los ciudadanos [en PISA, alumnos de 15 años] en las situaciones que comportan un contenido científico o tecnológico, dentro de unos contextos personales, sociales y globales definidos de una forma razonable y adecuada, para estar preparados para la vida en una sociedad moderna?»

La noción de competencia científica del marco teórico de PISA 2006 se caracteriza por cuatro aspectos interrelacionados que no actúan en un mismo plano, sino que se involucran mutuamente desde sus respectivas órbitas: la referencia contextual y tres "dimensiones", la cognitiva, la procedimental y la actitudinal. En esta investigación no compartimos esta terminología, porque reservamos el término "dimensión" para el análisis del aprendizaje mediante los esquemas de razonamiento y acción, y denominamos aspectos de la competencia a estas "dimensiones" de PISA 2006. Dado que el objetivo de este apartado es exponer el marco teórico de la Tesis, se desarrollan los aspectos de PISA 2006, eliminando el término "dimensión" (*Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento*, pág. 456). Los cuatro aspectos que caracterizan a la competencia científica son:

La referencia contextual consiste en el reconocimiento de las situaciones de la vida cotidiana relacionadas con la Ciencia y la Tecnología.

Las situaciones planteadas en las pruebas PISA recuerdan situaciones reales que conllevan problemas de relevancia personal, social o global. En cuanto a los ámbitos en los que se aplican los conocimientos y los procesos científicos, se

identifican tres: la Ciencia en la vida y la salud, la Ciencia en la Tierra y el medio ambiente y la Ciencia en la Tecnología (lo que incluye también las fronteras actuales de la Ciencia y la Tecnología).

El aspecto cognitivo abarca los conocimientos sobre el mundo natural y los conocimientos sobre la Ciencia en sí:

- El conocimiento del mundo natural (Física, Química, Biología, Ciencias de la Tierra y del espacio y las Tecnologías) o conocimiento de la Ciencia
- El conocimiento acerca de la ciencia, que hace referencia a la investigación científica y las explicaciones científicas.

El aspecto procedimental incluye las capacidades o destrezas científicas, concebidas como acciones mentales y/o físicas. Se destacan los procesos cognitivos propios de la actividad científica, como los razonamientos inductivo y deductivo, la representación y transformación de datos mediante gráficas o tablas, la construcción de explicaciones basadas en datos, la modelización y la utilización de herramientas matemáticas. Las destrezas o capacidades prioritarias para desarrollar estos procesos cognitivos se denominan "competencias científicas" para algunos autores (por ejemplo, Jiménez Aleixandre, Bravo y Puig, 2008) que enfatizan en la relación de estas destrezas con la apropiación de prácticas específicas del trabajo científico por parte de los alumnos. Estas destrezas o capacidades prioritarias (competencias científicas) están asociadas con los procesos de producción, evaluación y comunicación de conocimiento (Kelly (2008, pp. 99-100). La producción del conocimiento científico trata de construir, revisar y evaluar modelos científicos, de generar nuevas ideas en respuesta a problemas; la evaluación del conocimiento incluye contrastar hipótesis y enunciados con las pruebas disponibles, lo que implica argumentar a través de las pruebas; la comunicación del conocimiento científico implica comprender y elaborar mensajes científicos, persuadir a una audiencia, leer y escribir ciencia. En los procesos de producción y evaluación, las tareas relacionadas con la argumentación y el uso de pruebas ayudan a desarrollar una imagen actualizada del trabajo científico (Jiménez Aleixandre, 2010, capítulo 2). Las destrezas o capacidades prioritarias (competencias científicas) son:

- la identificación de cuestiones científicas, que a su vez se concreta en tres destrezas, para cada una de las cuales hemos incluido los elementos de la competencia que figuran en la clasificación de Cañas, Martín y Nieda (2007):
  - reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia (identificar preguntas de investigación y problemas de base científica, diferenciando el conocimiento científico de otras formas de conocimiento)
  - utilizar estrategias de búsqueda de información científica, comprenderla y seleccionarla (realizar observaciones directas o indirectas con conciencia del marco teórico, obtener y analizar datos e información)

- reconocer los rasgos clave de la investigación científica: plantear y contrastar conjeturas e hipótesis a la solución de un problema; analizar la relevancia y las variables incidentales y de control; diseñar y realizar experiencias; obtener conclusiones basadas en pruebas y comunicar conclusiones. Estos pasos pueden relacionarse con la perspectiva de indagación (*inquiry*) en la clase de Ciencias, en el sentido de que ayudan a avanzar desde las observaciones hacias las explicaciones (Jiménez Aleixandre, 1998).

- La explicación de fenómenos científicos, desglosada en tres elementos:
  - reconocer descripciones, explicaciones y predicciones científicas
  - describir o interpretar fenómenos científicamente y predecir cambios
  - aplicar los conocimientos de la Ciencia a una situación determinada
- La interpretación y uso de pruebas científicas, especificada en capacidades:
  - interpretar pruebas científicas, elaborar y comunicar conclusiones
  - argumentar en pro y en contra de las conclusiones
  - identificar los supuestos, las pruebas y los razonamientos que subyacen a las conclusiones
  - reflexionar sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos. Cañas, Martín y Nieda (2007) señalan junto a éste otros dos elementos, que aparecen en el *curriculum* LOE: reconocer la naturaleza, las posibilidades y los límites históricos de la actividad investigadora como construcción social del conocimiento, y utilizar valores y criterios éticos asociados a la Ciencia y al desarrollo tecnológico.

El aspecto actitudinal:

La literatura en Didáctica de las Ciencias tiende a admitir la distinción entre normas de actuación, valores y actitudes, en un modelo antropológico social en el que se considera a las personas como sujetos cuya formación actitudinal se produce en un medio social. La actitud es un concepto complejo, y en ocasiones no resulta fácil distinguir los distintos elementos afectivos (Sarabia, 1992). Se suele admitir que la actitud comporta tres tipos de componentes: cognitiva, afectiva e intencional. La actitud tiene su origen en las ideas personales (cognición), los valores y sentimientos de agrado o desagrado (afectividad), y de todo ello emerge un compromiso personal (intencionalidad), que se puede manifestar en distintas respuestas, como las opiniones (expresiones verbales) o los hábitos (acciones de la práctica cotidiana).

Las normas son las ideas o creencias sobre cómo hay que comportarse, así que en cierto modo son una componente cognitiva de la conducta. Si se define un valor como la apreciación, interés o utilidad atribuida a algo, entonces los valores se

refieren a al grado en que se han interiorizado los principios que rigen el funcionamiento de las normas de actuación (componente afectiva). Se suele afirmar que la actitud consiste en la predisposición a pensar (componente intencional) y actuar en consonancia con unos valores determinados (componente conductual). Algunos autores establecen una relación entre las actitudes y un comportamiento o conducta consistente con ellas, teniendo en cuenta que no es lo mismo afirmar que se mantiene una disposición de ánimo o acción hacia un aspecto, y realizar una acción efectiva en consecuencia. Por ejemplo, una persona puede asegurar que tiene una gran preocupación por el medio ambiente, pero de poco vale juzgar su actitud por sus afirmaciones si en su conducta diaria no hace nada por reciclar o ahorrar agua y energía (Pozo y Gómez Crespo, 1998). Éste es el modelo de la acción razonada y conducta planificada, que supone la existencia de una relación racional entre la predisposición a actuar y la conducta.

En el apartado anterior se ha comentado la preocupación de las comunidades institucional, educativa e investigadora en Didáctica de las Ciencias por el declive del interés de los jóvenes hacia las disciplinas científicas y su estudio. En este contexto, desde los años ochenta se han publicado varias revisiones sobre las actitudes del alumnado hacia las Ciencias, como la de Schibeci (1984), que examina el panorama axiológico del momento y lo compara con el de la década anterior, o la recensión de Escudero (1985), que pone de manifiesto los múltiples factores contextuales que influyen en las actitudes de los estudiantes. En las décadas posteriores continuará es esfuerzo por analizar detalladamente esta cuestión, con publicaciones como las de Vázquez y Manassero (1995) y Osborne, Simon y Collins (2003), por citar dos de las más destacadas. A comienzos del siglo XXI, los investigadores enfatizan cada vez más en la necesidad de revertir la situación de desinterés y rechazo de los jóvenes hacia las Ciencias y su aprendizaje (ver, por ejemplo, Solbes *et al.*, 2007; Vázquez y Manassero, 2008).

En Didáctica de las Ciencias se distingue entre actitudes hacia la Ciencia, hacia el aprendizaje de la Ciencia y hacia las implicaciones sociales de la Ciencia, aunque no todos los autores comparten esta categorización. Las actitudes que se incluyen en la competencia científica son, según la Cañas, Martín y Nieda (2007):

- El interés por el mundo físico, que a su vez implica, según el marco de la evaluación establecido por el MEC (2009):
  - Interesarse por la Ciencia y su aprendizaje (una actitud favorable a la investigación científica)
  - Mostrar curiosidad por el mundo físico, los procesos e interacciones.
  - Mostrar disposición para adquirir conocimientos y habilidades adicionales en relación con el mundo físico, utilizando diversos recursos y distintos métodos.

- Reconocer la práctica de hábitos asociados a la higiene, la alimentación, el ejercicio físico y el descanso como hábitos saludables.
- Tender a actuar en función de actitudes y hábitos favorables al cuidado y promoción de la salud individual y comunitaria, en aspectos relacionados con la alimentación, las enfermedades y las adicciones.
- Reconocer que para el ejercicio de muchas profesiones son necesarios conocimientos científicos, y saber aplicar procesos de este campo del saber.
- Valorar las repercusiones del desarrollo tecnocientífico.

- Respaldo a la investigación científica, lo que se manifiesta al:
  - Valorar la importancia de utilizar los conocimientos científicos y las interacciones de la Ciencia y la Tecnología para satisfacer las necesidades humanas individuales y comunitarias.
  - Mostrar disposición a utilizar conceptos y estrategias propios del trabajo científico para plantear preguntas relevantes y obtener conclusiones a partir de evidencias y pruebas experimentales.
- Sentido de la responsabilidad hacia uno mismo, los recursos y el entorno, que incluye varios elementos:
  - Mostrar disposición a mantener la limpieza, el orden y el ahorro de materiales y de energía, y a usar los recursos de manera responsable.
  - Valorar la responsabilidad personal hacia el medio ambiente y a favor de la conservación de los recursos naturales.
  - Valorar la importancia de participar en la toma de decisiones con vistas a asegurar un futuro sostenible.
  - Mostrar interés por las cuestiones éticas asociadas al conocimiento del mundo físico en relación con la ciencia, el desarrollo tecnológico y la relación de las personas con la naturaleza.
  - Tender a actuar de manera coherente, responsable y solidaria en cuestiones científicas socialmente controvertidas.

Por su flexibilidad y complejidad intrínsecas, la competencia científica constituye un instrumento útil en esta investigación de Tesis, porque ofrece la posibilidad de evaluar tanto el aprendizaje realizado por los estudiantes que constituyeron la muestra, como la capacidad o potencialidad de las propuestas de enseñanza ensayadas para ayudar a los alumnos a hacer evolucionar sus conocimientos, esto es, a desarrollar sus competencias científicas.

Dado que la perspectiva de evaluación de PISA 2006 mide el uso funcional del conocimiento científico, partimos de ella para diseñar el análisis del aprendizaje alcanzado por los estudiantes de la muestra en términos de las competencias que

éstos pusieron en juego a medida que realizaban las actividades de nuestras propuestas. El análisis por competencias ha sido útil para evaluar los avances que realizaron los alumnos en sus conocimientos científicos como consecuencia de su interacción con las unidades didácticas ensayadas, y para evaluar éstas según su capacidad para generar aprendizaje (ver ***Capítulo VIII***). Al analizar la articulación del conocimiento científico que utilizaron los estudiantes, se puso de manifiesto la potencialidad interpretativa de éste para resolver problemas (evaluación del aprendizaje), y, al enfocar el análisis desde el planteamiento y el perfil de las cuestiones problemáticas que se plantearon, se evidenció la potencialidad de activación que otorgó cada individuo al conocimiento científico en la resolución de cuestiones relacionadas con distintos ámbitos de conocimiento y presentadas en diferentes situaciones, para distintos hechos y fenómenos (evaluación de las propuestas ensayadas en términos de las competencias que pusieron en juego en sus respuestas a las actividades y pruebas realizadas).

I.3.4.3. Actualidad de la investigación en Didáctica de las Ciencias

La investigación sobre propuestas metodológicas ha ocupado un puesto privilegiado en la investigación en Didáctica de las Ciencias desde los años ochenta (Gabel y Sherwood, 1984; Mata y Anta, 1986; Caballer, 1986; Moreira y Novak, 1988; Saura, 1996; Perales, 2000b, Capítulo 1). Hay una retroalimentación entre la investigación y el diseño de secuencias de enseñanza, porque la investigación diseña, aplica y evalúa secuencias de enseñanza, y éstas suelen proporcionar herramientas y nuevos campos para la investigación (Méheut y Psillos, 2004).

En las dos últimas décadas del siglo XX, muchas de las aportaciones que han conducido a la publicación de propuestas didácticas completas (Domínguez Castiñeiras, 2000) siguen el formato de los programas-guía propuestos por Gil (1987): presentan un conjunto de actividades secuenciadas (programa) mediante las que reconfiguran el *curriculum* y lo proyectan a una serie organizada de situaciones de aprendizaje dirigidas a la construcción de conocimiento (Domínguez Castiñeiras, 2007). La mayoría de las propuestas introducen dinámicas de trabajo innovadoras.

Entre los años 80 y 90, en España han tenido lugar distintos proyectos didácticos formulados por grupos de investigadores y docentes, como los del Seminario Permanente de Física y Química "Vegas Altas del Guadiana" (1987), los del Grupo Axarquía (1990), o los proyectos *Natureza na Cidade* (Membiela *et al.*, 1994), y *AcAb* de Química y de Física (García-Rodeja *et al.*, 1987, 1994). En el plano internacional destacan los proyectos *CLIS* de la Universidad de Leeds (Driver *et al.*, 1984); *SEPIA* o *Science Education through Portfolio Instruction y Assessment* (Duschl y Gitomer, 1996), los desarrollados por el *National Research Council* (1996, 2000, 2001, 2007), y el proyecto *RODA*, en el que participa la USC (ver www.rodausc.eu). Sin embargo, la investigación educativa sigue teniendo poco impacto en las prácticas de

aula, y pocos docentes de la enseñanza no universitaria participan como autores de trabajos de investigación (Pro, 2009f).

Los referentes que hemos seguido para el diseño de los materiales de aula de las propuestas didácticas sobre Termoquímica y Termodinámica Química, son el *Proyecto AcAb Física* (en particular la unidad didáctica *AcAb Calor y Temperatura*) y las líneas del proyecto *RODA*, mediante el cual se pretende promover en el aula las destrezas de razonamiento y argumentación.

En cuanto a los rasgos más generales de la investigación sobre propuestas metodológicas, parece que no existe un modelo único que guíe las estrategias investigadoras en Didáctica de las Ciencias Experimentales. Sí se observan algunas tendencias concretas, que resumimos a continuación:

- Las estrategias metodológicas en auge rechazan casi unánimemente los viejos modelos teóricos basados en la transmisión-recepción o en el descubrimiento autónomo, y eligen modelos teóricos más identificados con los que hemos presentado en los apartados anteriores. Muchas tienen por eje central los trabajos prácticos y la resolución de problemas en Ciencias.
- Sin embargo, al mismo tiempo se han afirmado como habituales las investigaciones que analizan la efectividad de las propuestas metodológicas utilizando variables relacionadas con la adquisición de conocimientos conceptuales, y en menor medida la de los procedimentales y actitudinales.
- Se ha abandonado progresivamente la generalización de los resultados a partir de muestras representativas o de situaciones de laboratorio difícilmente extrapolables. Frente a la antigua tendencia a utilizar grupos de control, se observa un creciente interés por utilizar varios grupos experimentales que constituyan una muestra completa.
- Se verifica una evolución significativa en el concepto de evaluación, tanto en las variables como en las técnicas de análisis, en relación con las perspectivas que enfatizan en el papel de la argumentación en el aprendizaje.
- Cada vez se insiste más la necesidad de que se realice una caracterización inicial de los estudiantes, aunque no se ha alcanzado un consenso explícito ni se ha generalizado sobre las variables objeto de diagnóstico. El análisis se suele centrar en los conocimientos conceptuales; con menor frecuencia se indaga en otros tipos de conocimiento o en factores como etapas o grados de desarrollo cognitivo.
- Se incrementa el número de investigaciones en las que se evalúan los aprendizajes un cierto tiempo después de la intervención didáctica. El enfoque se dirige en algunos casos a la exploración de la significatividad del aprendizaje, aunque se detecta una preferencia por el análisis de los conocimientos que los alumnos retienen en la memoria a largo plazo. En los

últimos años crece el número de estudios que abarcan períodos muy extensos de aprendizaje, como las *learning progressions* o progresiones del aprendizaje (ver, por ejemplo, National Research Council, 2007), en las que se explora a lo largo del tiempo la trayectoria de la construcción de conocimientos. En Termodinámica, alguna de las investigaciones recientes apuntan en esta dirección (Lee y Lui, 2010; Neumann *et al*., 2013).

- Se observa poca profundización en el proceso de evolución de los esquemas de conocimiento de los alumnos (Camapanario, 2004), y hay pocas investigaciones sobre los esquemas de razonamiento y acción.
- Por ahora, la naciente investigación sobre el desarrollo de competencias científicas en el aula de Ciencias parece derivar hacia el estudio de los aspectos procedimentales relacionados con los trabajos prácticos en el aula y la resolución de problemas (Duschl y Grandy, 2008; Kelly, 2008). Esta nueva tendencia puede considerarse un impulso hacia el cambio del énfasis investigador desde el estudio de productos al estudio de procesos (Jiménez Aleixandre, 1998; Erduran y Jiménez Aleixandre, 2008a).
- Las investigaciones tienden a revisar más profunda y sistemáticamente la acción educativa. Es positivo el interés creciente del profesorado por incorporar las innovaciones didácticas al aula y por reflexionar sobre los hallazgos de las investigaciones para mejorar su práctica docente, aunque la práctica docente todavía está lejos de la investigación y la innovación en Didáctica de las Ciencias (Banet, 2007; Pro, 2009f).
- Predominan los estudios longitudinales frente a los transversales. Abundan los diseños de tipo *ex post facto*, por su facilidad de realización y difusión.

Es evidente que no existe una estrategia única o ideal para investigar propuestas metodológicas en el aula. Desde hace varias décadas se dispone de una gran variedad (Porlán, 1987a, 1987b; Rodríguez, Gutiérrez y Molledo, 1992): hay métodos interactivos, como la observación participante o la entrevista, y métodos no interactivos, como los protocolos de observación de interacciones, la grabación, la recogida de documentos (por ejemplo, diarios de clase o cuestionarios).

A la hora de seleccionar una estrategia u otra, creemos que se debe tener en cuenta la estrecha relación que existe en Didáctica de las Ciencias entre la experimentación y la investigación (Gutiérrez, 2000), y en consecuencia hay que primar la coherencia entre la intencionalidad de la experiencia y los métodos de recogida de la información. En todo caso, independientemente del tipo de investigación y de su marco experimental de referencia, no deben perderse de vista los fundamentos de la investigación en Didáctica de las Ciencias: lo primordial es mejorar el aprendizaje de los estudiantes y contribuir a facilitar el trabajo diario del profesorado (Yager y Kahle, 1982; Viennot, 1989; Gilbert, De Jong, Justi y Treagust,

2002). Estas prioridades exigen que se cumpla con rigor y fiabilidad la recogida de datos, y que los resultados obtenidos se interpreten en profundidad.

La información más valiosa para el investigador es, casi siempre, aquélla que se encuentra más contextualizada en el proceso de enseñanza y aprendizaje. En este sentido, consideramos de gran utilidad las manifestaciones orales y escritas del alumnado a lo largo de las distintas situaciones de aprendizaje, porque los cuadernos de trabajo de los alumnos, las intervenciones del docente y los debates y las discusiones que se producen durante la realización de las tareas, proporcionan una información valiosísima sobre el proceso de construcción del conocimiento conceptual y procedimental, y sobre el desarrollo de actitudes y valores.

Insistimos en la dicotomía entre los paradigmas cualitativo y cuantitativo: el desarrollo de ambos ha generado grandes aportaciones a la investigación, y ha permitido una sistematización y reflexión trascendentales en el conocimiento de la realidad de aula. Sin embargo, consideramos que ha de rechazarse toda tentación de etiquetar y, con ello, limitar o estereotipar un ámbito de investigación tan amplio y complejo como es el de la educación (Domínguez Castiñeiras, 2000).

El trabajo que se presenta es una investigación *quasi*-experimental, encuadrada dentro de los estudios interpretativos. Se trata de un estudio de caso en el que se evalúa el aprendizaje desarrollado por un grupo de estudiantes en relación con la aplicación de dos propuestas didácticas sobre la Termodinámica de los procesos químicos (*Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la* investigación, pág. 312). La estrategia de investigación se expone en el ***Capítulo II***. Se diseñaron instrumentos de evaluación específicos para explorar el aprendizaje: los esquemas de razonamiento y de acción y las competencias (*TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje*, pág. 449).

Como se requería averiguar la evolución de los esquemas de razonamiento y de acción de los alumnos, así como las competencias que desarrollaron durante la intervención, se necesitaba evaluar los logros de aprendizaje con respecto a los conocimientos deseables. Para este propósito sirvieron los esquemas de razonamiento y de acción representativos de la ciencia escolar, a partir de los cuales hemos podido elaborar y estudiar los esquemas de los estudiantes (*Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje*, pág. 380); también se hicieron explícitas las competencias referenciales para las propuestas objeto de análisis, que han servido para establecer las competencias de los alumnos (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, pág. 458).

I.3.5. Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias

Este apartado está dedicado a la revisión de las tres últimas décadas de la investigación sobre la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica de los procesos

químicos, con el objeto de analizar aquellas contribuciones que pueden tener implicaciones para esta investigación. De los resultados que consideramos más relevantes para nuestro trabajo investigador, se extraen varias conclusiones que ayudan a configurar parte del marco teórico en el que se encuadra el diseño de las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química (*Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la* investigación, pág. 312).

La estructura del texto procura recrear la secuencia cronológica del trabajo de investigación, para que se observen con más claridad los pasos que se siguieron en la elaboración de la Tesis (*Fases del plan de trabajo y cronología de la investigación*, pág. 260). El estado original de la cuestión se realizó entre finales de 2007 y principios de 2008, así que las publicaciones en las que se basa la investigación datan de antes de 2009. Por motivos personales y laborales, la autora se vio obligada a postergar este trabajo durante casi tres años, y solamente pudo retomarlo a finales de 2012, momento en que decidió añadir nueva bibliografía para actualizar el estado de la cuestión. A lo largo de 2013, durante la redacción de la Memoria, se añadieron las aportaciones correspondientes a dicho año. Después de un nuevo parón forzoso que frustró el término del trabajo, en 2014 se recogieron aquellas nuevas citas bibliográficas que pueden ayudar al lector a ampliar la compilación bibliográfica sobre la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica.

El estado de la cuestión es, en síntesis, un texto académico en el que se exponen los avances acerca de un tema o aspecto de interés para la investigación, centrándose en los resultados de aquellos trabajos que tienen por objetivo responder directa o indirectamente a las cuestiones más relacionadas con los problemas que se plantean. Así pues, a lo largo de este apartado se revisan las investigaciones publicadas sobre dos aspectos, cada uno de ellos desarrollado en un apartado distinto. A estos apartados se ha antepuesto uno introductorio en el que se resume el panorama investigador sobre la enseñanza de la Termodinámica de los procesos químicos (*Introducción: la enseñanza de la Termodinámica de los procesos químicos en la investigación*, pág. 120). Los dos apartados en los que se articula el estado de la cuestión propiamente dicho son los siguientes:

Un primer apartado (*Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica*, pág. 123), en el que se exponen los conocimientos del alumnado en Termoquímica y Termodinámica Química. Se analizan las fuentes de la problemática de aprendizaje en el área, y a continuación, siguiendo los enfoques de investigación en concepciones alternativas a los que se refieren Pintó, Aliberas, y Gómez (1996), se exponen las ideas alternativas, las formas de razonamiento y los modelos mentales que se han detectado en los estudiantes de enseñanza secundaria y universitaria.

Un segundo apartado (*Propuestas y materiales de enseñanza en Termoquímica y Termodinámica Química*, pág. 198), en el que se revisan las propuestas de enseñanza

elaboradas por investigadores de Didáctica de las Ciencias Experimentales, detallando sus enfoques metodológicos y las principales características de las secuencias de actividades.

I.3.5.1. Introducción: la enseñanza de la Termodinámica de los procesos químicos en la investigación

Se comentaron en el apartado *Concreción de la investigación: razones para investigar sobre la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos* (pág. 7) las principales razones que nos impulsaron a estudiar el tema de la Termodinámica de los procesos químicos. Al margen del desarrollo de nuestra línea de investigación, hay otros motivos que tienen que ver con la naturaleza de la Termodinámica, y que la literatura en Didáctica de las Ciencias respalda:

La Termodinámica, la Cinética y el Equilibrio son las bases de la Dinámica de los procesos naturales, tema central de la Física, la Química y la Biología. Una prueba de la importancia que se da a la Termodinámica en la comunidad científica es que, entre 1998 y 2003, se publicó en el *Journal of Chemical Education* un centenar de artículos relacionados con su epistemología (Pétursson, 2003).

No es de extrañar, pues, que el estudio de esta disciplina esté incluido en los *curricula* de la enseñanza secundaria de todos los países. Ya hemos indicado que la Ciencia hace uso de la Termodinámica para describir, justificar y predecir los aspectos energéticos de los procesos naturales (Solbes y Tarín, 2004) y los mecanismos que hacen posibles los cambios en los sistemas materiales (Gillespie, 1997; Sözbilir, 2004b). Si admitimos que la enseñanza de las Ciencias debe encaminarse a que el alumnado utilice conceptos, modelos y procedimientos científicos para analizar y actuar ante hechos, fenómenos y situaciones de la vida personal y social, los conocimientos relacionados con la Termodinámica contribuyen a estas finalidades de la ciencia escolar, además de ayudar a construir una imagen actualizada de la Ciencia y de su papel en el desarrollo de la tecnología y la cultura contemporáneas (Gillespie, 1997). Según Gillespie (1997), existen seis constructos científicos que son clave para comprender las bases de la Química moderna, y cualquier curso introductorio de Química debería estructurarse alrededor de ellos. El primero es el de partícula (átomo, molécula e ion); a continuación vienen el enlace químico y la geometría molecular, que sirven de base para llegar al cuarto constructo: el modelo cinético molecular. En quinto lugar, se introduce la reacción química como proceso de cambio de los sistemas. Como sexto y último constructo esencial, Gillespie (1997) incluye los conceptos y principios básicos de la Termodinámica Química, que explican por qué algunas reacciones suceden y otras no, y en qué condiciones son favorables.

Por otra parte, la Termodinámica es uno de los temas más interesantes y controvertidos en la historia de la Ciencia, y un ejemplo ilustrativo para

comprender, más allá del pasado de la cultura y de la actividad científica, los cambios que se producen en los paradigmas científicos y, con ello, los mecanismos por los que evolucionan los productos y procesos de la Ciencia.

Sin embargo, la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica no ha recibido por parte de la comunidad en Didáctica de las Ciencias toda la atención que cabría esperar que se le dedicase a una de las bases de la Dinámica de los procesos químicos (Stylianidou y Boohan, 1998; Barker y Millar, 2000). De hecho, existen pocas propuestas didácticas completas publicadas sobre Termoquímica y Termodinámica Química (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008a), y son todavía más escasas las que tratan el tema desde el punto de vista químico y biológico; sí se han divulgado algunas actividades prácticas de laboratorio, además de cuestionarios y actividades introductorias que son interesantes para explorar las ideas previas del alumnado (*Propuestas y materiales de enseñanza en Termoquímica y Termodinámica Química*, pág. 198).

Mientras que muchas de las investigaciones se dedican a identificar ideas alternativas y dificultades de aprendizaje, es mucho menor el número de publicaciones que indagan en sus causas de origen y persistencia, o que proponen materiales y métodos didácticos para trabajar sobre ellas.

En cuanto a las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje en Termodinámica, la publicación pionera y referencia obligada de trabajos posteriores es la de Johnstone, MacDonald y Webb (1977a), encuadrada en una perspectiva ausubeliana desde la que se considera que las concepciones alternativas son dificultades conceptuales. Recordemos que, paralelamente a los avances en Didáctica de las Ciencias, se incorporarían a las visiones "clásicas" de las concepciones alternativas (como la ausubeliana) otros dos enfoques sobre los conocimientos con los que los alumnos llegan al aula (Pintó, Aliberas y Gómez, 1996): el estudio de las formas de razonamiento (Salinas, Cudmani y Pesa, 1996; Furió y Calatayud, 2000) y el análisis de los modelos mentales (Johnson-Laird, 1989; Greca y Moreira, 1998, 2001; Coll y Treagust, 2001a; Coll y Taylor, 2002; Coll y Treagust, 2003; Taber, 2003). En el campo de la Termodinámica, las publicaciones sobre las formas de razonamiento que emplean los alumnos tienen su máximo exponente en Viennot (1998) y Rozier y Viennot (1991), aunque cabe destacar también trabajos como los de Andersson (1986); Gutiérrez y Ogborn (1992); Furió y Furió-Más (2000), Barker y Millar (2000) o Boo y Watson (2001). El enfoque de los modelos mentales apenas está explorado.

Otro aspecto que centra buena parte de la literatura es la epistemología de la Termodinámica. Desde los años 80, la comunidad investigadora ha mantenido algunas discusiones más o menos acaloradas sobre la naturaleza, la definición y el significado físico de ciertos constructos termodinámicos, como la energía, la entropía… Ante la dificultad de indagar en el significado estricto de determinados

conceptos bastante útiles e históricamente relevantes, por ejemplo el calor y el trabajo, se ha llegado a plantear la conveniencia de desterrarlos de los ámbitos comunes de uso y hasta de la propia Ciencia. No es de extrañar, pues, que existan pocas investigaciones didácticas sobre la Termodinámica, dado que ésta es una disciplina tan abstracta y tan conceptualmente demandante que incluso entre los científicos se continúan discutiendo aspectos sobre los que se lleva décadas trabajando, pero cuyo significado todavía no está lo suficientemente claro o preciso.

Derivada de la problemática epistémica, en los años 80 saltó a la palestra de las publicaciones de Didáctica de las Ciencias una encendida polémica a la que ya hemos aludido en *Concreción de la investigación: razones para investigar sobre la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos* (pág. 7): a la vista de la dificultad que entraña el aprendizaje de la Termodinámica, algunos autores abogan por suprimirla de la enseñanza secundaria, argumentando que es demasiado abstrusa para el alumnado adolescente y demasiado poco relevante para la construcción de un *corpus* elemental de conocimiento científico (desde Wright, 1974, Battino, 1979, en los años 70, hasta Liu y McKeough, 2005, Quílez, 2009 a comienzos de este siglo). En el apartado *Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica* (pág. 123) analizamos detenidamente esta polémica. Por nuestra parte, ya hemos declarado que la enseñanza de las Ciencias no debería ignorar la Termodinámica, que es nada menos que uno de los ejes centrales del conocimiento científico actual y una de las disciplinas de mayor repercusión en los avances científicos y tecnológicos (y, por tanto, sociales) de los tres últimos siglos, además de un campo de batalla histórico en la lenta y difícil consolidación de la Ciencia como constructo social.

Prácticamente todos los trabajos de investigación publicados hasta la fecha coinciden en que la Termodinámica es uno de los temas más difíciles de entender de la Química, a juicio tanto de los alumnos de enseñanza secundaria y universitarios (Moore y Schwenz, 1992; Banerjee, 1995; Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 2002; Sözbilir y Bennett, 2007), como de los profesores, quienes en general se muestran preocupados por el bajo nivel de aprendizaje que se desarrolla en esta área (Granville, 1985; Carson y Watson, 1999).

Muchas de las ideas alternativas y obstáculos de aprendizaje en Termodinámica persisten incluso tras una instrucción que las combata explícitamente (Ochs, 1996; Teichert y Stacy, 2002), y pueden reaparecer cuando se las consideraba ya desterradas (Arnold y Millar, 1996). La práctica totalidad de los autores que han explorado esta cuestión aseguran que las ideas y estructuras de razonamiento alternativas desarrolladas en los primeros años de escolarización condicionan muy significativamente el aprendizaje (Ochs, 1996; Carson y Watson, 1999; Boo y Watson, 2001; Carson y Watson, 2002), y gran cantidad de ellas se mantienen, por ejemplo, en el Bachillerato, y entre el primer y el segundo curso no existen grandes avances hacia las concepciones de la ciencia escolar (Roldán-Ruíz *et*

al., 2012). Sin embargo, no se ha ahondado en este tema (Thomas y Schwenz, 1998), y al analizar la literatura se observa que los trabajos sobre el aprendizaje prefieren centrarse en la detección de ideas alternativas de los alumnos universitarios, mientras que los primeros niveles de enseñanza reciben menos atención, como se comenta en el apartado *TAREA* 2.- *Problemática de aprendizaje y de enseñanza de los contenidos (análisis didáctico del contenido deseable)* (pág. 414).

I.3.5.2. Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica

A continuación se analiza la problemática de aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos. Primero se indican las principales dificultades inherentes a la disciplina, atendiendo a los aspectos ontológicos y epistemológicos que se ponen en juego en su comprensión, y después se describen las ideas alternativas del alumnado que se han recopilado en la literatura en Didáctica de las Ciencias hasta 2014, discutiendo sus fuentes de origen. Como sucede en otras áreas de la Ciencia (ver, por ejemplo: Driver, 1981), las ideas alternativas en el ámbito de la Termodinámica son comunes a alumnos de muy diversa procedencia geográfica y social (Doménech Blanco, 2000).

Orígenes y causas de las dificultades de aprendizaje en Termodinámica

En general, los alumnos consideran que la Termodinámica es una disciplina aburrida y muy teórica, de escasa o nula relevancia para los estudios posteriores y para la vida real (Holman y Pilling, 2004). Solamente quienes se especializan en Ciencias parecen reconocer su utilidad, pero en general no ponen en juego los conocimientos termodinámicos en sus respuestas a cuestiones de base científica, y menos en los contextos de problemas relacionados con la Biología o la Bioquímica (Ochs, 1996). Más de la mitad de los estudiantes entran en clase de Termodinámica con una percepción negativa de la materia y con poca esperanza de aprobarla, sobre todo los que creen no tener una base matemática sólida (Holman y Pilling, 2004). Estas malas expectativas parecen guardar una relación directa con la suposición de que la Termodinámica consiste en una serie de ecuaciones incomprensibles que uno debe aprenderse de memoria para hacer ciertos cálculos sin sentido que permiten aprobar los exámenes (Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 1999; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002; Sözbilir, 2004a; Sözbilir y Bennett, 2007). Desde la enseñanza no se debe ignorar que esta idea está ampliamente extendida entre los estudiantes, y no sólo en relación con la Termodinámica, sino a toda disciplina científica en la que para resolver las cuestiones planteadas se hace necesario un tratamiento matemático de datos numéricos.

Al nivel que se propone para la enseñanza secundaria, comprender la Termodinámica requiere manejar simultáneamente más de dos variables, construir razonamientos complejos, utilizar modelos de la estructura y propiedades de la

materia para analizar los cambios físicos o químicos, y conocer algunos aspectos de las entidades, operaciones y simbología matemáticas. Así pues, las dificultades inherentes a la Termodinámica se extienden a aspectos tan amplios y diversos que son numerosas las fuentes capaces de generar obstáculos a la construcción de los conocimientos con los que la Ciencia describe e interpreta los cambios que experimentan los sistemas materiales. A grandes rasgos, las fuentes de la problemática de aprendizaje de la Termodinámica coinciden con las causas generales de que muchos alumnos de todos los niveles educativos no tengan éxito en el aprendizaje de la Química después de muchos años de esfuerzo personal e instrucción escolar (Nakhleh, 1992).

A lo largo de los apartados siguientes se recogen varias reflexiones sobre las dificultades de aprendizaje que se relacionan con las siguientes características inherentes a la Termodinámica: la integración de los tres dominios de representación de la materia para elaborar razonamientos (*Dificultades relacionadas con la integración de los dominios de representación de la materia*, pág. 124); la complejidad de las formas de razonamiento que se requieren para interpretar los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos (*Nivel de abstracción, demanda conceptual, manejo simultáneo de variables y construcción de razonamientos complejos en la Termodinámica***Nivel de abstracción, demanda conceptual, manejo simultáneo de variables y construcción de razonamientos complejos en la Termodinámica**, pág. 128), complejidad que se relaciona con la demanda cognitiva de los constructos termodinámicos y con el manejo simultáneo de variables; el tratamiento matemático necesario para transformar los datos termodinámicos en resultados que permiten llegar a conclusiones (*El tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas*, pág. 133); y la necesidad de conocer algunos prerrequisitos conceptuales como la estructura corpuscular de la materia, las interacciones químicas, los procesos químicos, la energía y sus procesos de transferencia… (*Los prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica*, pág. 136) También se revisan aquellas dificultades de aprendizaje en Cinética Química y Equilibrio Químico que tienen algún vínculo con los aspectos termodinámicos (*Otras disciplinas de la Dinámica: Cinética Química y Equilibrio Químico*, pág. 156).

Dificultades relacionadas con la integración de los dominios de representación de la materia

Según Johnstone (1982), el conocimiento químico se estructura en tres niveles o dominios de representación: macroscópico, microscópico y simbólico. En el dominio macroscópico se enmarcan aquellas representaciones que adquirimos mediante la experiencia sensorial: lo visible, lo tangible, lo que produce sensaciones organolépticas, etcétera; se trata de un nivel descriptivo y funcional del conocimiento. El dominio microscópico, de carácter explicativo, incluye el conocimiento científico que representa la materia en términos de partículas e interacciones entre ellas, de manera abstracta y a un nivel no perceptible por los

sentidos. El dominio simbólico, por su parte, engloba la expresión del conocimiento macro y microscópico mediante signos como la simbología matemática, representaciones gráficas, ecuaciones y otros símbolos químicos, imágenes o dibujos (Johnstone, 2000).

El aprendizaje de la Química requiere interpretar la realidad visible (macroscópica) en función de su estructura interna (microscópica), y representar las interpretaciones construidas mediante una simbología adecuada a los conocimientos utilizados. Así pues, se necesita crear una constante interacción entre los niveles macroscópico y microscópico, y utilizar un conjunto de símbolos adecuados, rigurosos y estandarizados.

Según Gabel (1999), parte de los problemas de aprendizaje que se han detectado en el ámbito de la Química son consecuencia de una pobre integración de los tres niveles, lo que genera una falta de comprensión conceptual y un aprendizaje superficial. Esta falta de integración parece subyacente a muchas dificultades que se presentan en todos los niveles educativos y que persisten tras varios años de instrucción (Furió y Furió, 2000). Numerosos estudios posteriores han confirmado que estos obstáculos son comunes en la Química en general (Harrison y Treagust, 2000b; Nicoll, 2001; Raviolo y Martínez, 2003; Treagust, Chittleborough y Mamiala, 2003; Çalik, 2005; Ünal, Çalik, Ayas y Coll, 2006) y en la Termodinámica en particular (por ejemplo, Abraham, Gryzybowski, Renner y Marek, 1992; Abraham, Williamson y Westbrook, 1994; Ebenezer y Fraser, 2001; Novak, 2003). Es por este motivo por el que tantos autores se han ocupado de esta cuestión, que repercute en el aprendizaje de los estados de agregación, el cambio químico, la reactividad y la estabilidad química, los mecanismos de reacción, la estereoquímica y la Termodinámica, por citar algunos de los ejemplos más estudiados (Abraham *et al.*, 1992; Furió y Furió, 2000).

Parece que los problemas de aprendizaje sobre el mundo de las partículas y sus interacciones tienen un origen común: las entidades microscópicas no pueden percibirse por los sentidos ni deducirse fácilmente de las observaciones empíricas, y entran directamente en competición con las formas del pensamiento perceptual (macroscópico), al que otorgamos una gran credibilidad porque es el nivel representacional que sustenta la mayor parte de nuestras interpretaciones de la vida diaria. Muchos estudiantes no llegan a desarrollar una "consciencia microscópica" (Furió y Furió-Más, 2000) incluso después de varios cursos escolares, y limitan sus interpretaciones a los aspectos macroscópicos. Otros desarrollan una consciencia microscópica alternativa que podemos denominar "macrocorpuscular" (Talanquer, 2005) y que se manifiesta en la atribución de características macroscópicas (color, forma, propiedades físicas…) a las partículas microscópicas. Por ejemplo, pueden opinar que los átomos de azufre son amarillos y los de cobre, maleables (Boo, 1998), o que las partículas de los ácidos tienen aristas que los hacen corrosivos (Furió y Furió-Más 2000). Por supuesto, estas propiedades de las partículas son susceptibles

de cambiar como consecuencia de los procesos físicos o químicos, durante los cuales un átomo o molécula puede variar su forma o su tamaño, o disolverse, evaporarse…

Esta consciencia macrocorpuscular surge de una concepción realista ingenua, según la cual la realidad del mundo es tal cual la detectan nuestros sentidos (Pozo y Gómez Crespo, 1998). El mundo microscópico es isomorfo al macroscópico, o dicho de otra manera, es como el mundo macroscópico pero "en diminuto" (Furió y Furió-Más, 2000; Talanquer, 2005). Esta concepción es la responsable, por ejemplo, de que algunos alumnos interpreten el estado de equilibrio termodinámico como un estado estático: todo proceso termina por detenerse a nivel macroscópico, así que en el equilibrio las partículas del sistema también estarán detenidas.

En el apartado *Los prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica* (pág. 136) enunciamos algunas de las ideas y modelos alternativos que sostienen los alumnos sobre cuestiones que se encuadran plenamente en el dominio microscópico, como son la estructura corpuscular de la materia y las interacciones químicas. En general, parece que estas ideas no forman modelos persistentes y estables, debido a la visión ontológica y empirista que sostienen los estudiantes sobre el mundo natural (Furió y Furió-Más, 2000).

En ocasiones, el salto conceptual que el estudiante debe realizar desde el mundo macroscópico al microscópico puede verse complicado por factores como la polisemia del lenguaje cotidiano (Boo, 1998) o las interpretaciones y símbolos que se utilizan en los contextos de enseñanza y aprendizaje. Así, si en el libro de texto se representan los átomos de azufre como esferas de color amarillo, esta simbología puede reforzar en el alumnado la transferencia de las propiedades macroscópicas de la sustancia química a las partículas que la forman (Garnett, Garnett y Hackling, 1995). Para evitar estos obstáculos, en la enseñanza debe tenerse en cuenta que los estudiantes tienen dificultades para reemplazar los modelos concretos analógicos por otros abstractos (Harrison y Treagust, 2000a), y que los conceptos y modelos científicos no deben presentarse como entidades reales, factuales y finales (*Secuencias de enseñanza*, pág. 66), sino como nociones descriptivas y explicativas sujetas a revisión y cambio.

Además, las dificultades de aprendizaje relacionadas con un dominio de representación cualquiera pueden influir en la aparición o permanencia de obstáculos relacionados los otros dos dominios. En la literatura, se han detectado numerosas dificultades en la relación entre los conocimientos macroscópicos y microscópicos y sus representaciones simbólicas. Por ejemplo, se pueden manipular ecuaciones químicas sin visualizar lo que representan, y muchos alumnos que no llegan a resolver problemas abiertos o auténticos sí se muestran capaces de obtener un resultado numérico para responder a cuestiones cerradas o ejercicios simples, porque aplican mecánicamente los algoritmos adecuados para llegar a un número final que enuncian como solución (Nuremberg y Pickering, 1987; Nakhleh y

Mitchell, 1993). En Termodinámica, Barlet y Mastrot (2000) han analizado detenidamente esta tendencia a refugiarse en la manipulación de algoritmos (*El tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas*, pág. 133). También tienden a interpretar la información de las ecuaciones químicas desde la perspectiva macroscópica de los cambios en el aspecto observable del contenido del recipiente, sin explicar las transformaciones como el resultado de cambios en las interacciones entre las partículas del sistema.

Los enfoques habituales de la enseñanza de la Termodinámica no contribuyen a superar estas dificultades de integración de los dominios de representación del conocimiento. Cuando se comienza el estudio de los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos, suele plantearse a los alumnos una perspectiva meramente macroscópica que se refuerza a lo largo de varios cursos. Se generan interpretaciones enmarcadas en una Termodinámica Clásica que parte de una base fenomenológica *ad hoc*, sin justificación ni estructura conceptual coherente, que impide la construcción de redes racionales de conceptos científicos (Novak, 2003). La perspectiva microscópica de los procesos termodinámicos se introduce años después, y en general no es suficiente para salir al paso de las dificultades que haya creado el tratamiento meramente macroscópico; más aún si tenemos en cuenta que la visión microscópica se presenta al alumnado *via* mecánica estadística (Novak, 2003). Este enfoque de enseñanza poco integrador de los dominios de representación del conocimiento repercute en la ausencia de complementariedad macro-microscópica en las interpretaciones que dan los alumnos a los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos (Furió-Gómez *et al.*, 2006, 2007).

Entre las razones de la aproximación macroscópica a la enseñanza destacan dos motivos: en primer lugar está la pretensión de imitar el desarrollo histórico de la Termodinámica como disciplina científica (Furió-Gómez *et al.*, 2007); el segundo motivo para aguardar varios años a introducir la perspectiva microscópica es evitar que los alumnos tengan que realizar el tratamiento matemático complejo que se requiere en Termodinámica Estadística.

Sobre esta cuestión, autores como Novak (2003) plantean la siguiente pregunta: ¿cómo se pueden construir interpretaciones puramente macroscópicas que resulten útiles para analizar la gran variedad de procesos naturales (isotérmicos, adiabáticos, reversibles, irreversibles…) que suceden en los sistemas reales, altamente complejos (máquinas térmicas, sistemas químicos…)?

Sin la complementariedad y la potencialidad interpretativa que dan los modelos microscópicos será difícil que los estudiantes lleguen a construir razonamientos científicos útiles para describir, justificar o predecir aspectos termodinámicos de los fenómenos naturales. Así pues, al tiempo que se desarrolla la perspectiva macroscópica, más perceptible, debe construirse la interpretación microscópica de las observaciones que se vayan realizando.

Nivel de abstracción, demanda conceptual, manejo simultáneo de variables y construcción de razonamientos complejos en la Termodinámica

En la construcción y transferencia del conocimiento científico, se elaboran razonamientos complejos que articulan los significados y las implicaciones de entidades teóricas abstractas, y se ponen en juego destrezas y estrategias relacionadas con el control y exclusión de las variables que se declaran para analizar la realidad. El alto nivel de abstracción y la demanda conceptual de los constructos teóricos, así como el manejo simultáneo de variables y la construcción de razonamientos complejos, son característicos de buena parte del conocimiento químico y, en particular, del termodinámico. La literatura emanada de la investigación en Didáctica de las Ciencias ha puesto de manifiesto que buena parte de las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje en Termodinámica tienen que ver con estas características del conocimiento científico: la naturaleza abstracta de los conceptos químicos y de las relaciones que éstos establecen en los modelos y teorías (Dixon y Emery, 1965; Nakhleh M. B., 1992; Nicoll, 2001), y la complejidad de los razonamientos que se requiere elaborar (Watson, Prieto y Dillon, 1997, Pozo y Gómez Crespo, 1998; Viennot, 1998; Furió y Furió-Más, 2000; Holman y Pilling, 2004; Talanquer, 2005).

Los investigadores reconocen que los constructos termodinámicos se encuentran entre los más abstractos de las Ciencias, y que su naturaleza genera numerosas dificultades al alumnado. Un buen ejemplo de ello son los numerosos trabajos que han investigado las nociones alternativas de los estudiantes sobre un concepto termodinámico sencillo, la temperatura (en Domínguez, 2000 se recoge una detallada revisión sobre este tema). En los años 60, Dixon y Emery (1965) construyeron una escala en la que ordenaban las magnitudes termodinámicas según su nivel de abstracción, valorado entre el 1, el nivel mínimo, y el nivel 6, máximo. Si se adjudica el nivel uno de abstracción a la temperatura, conceptos como la energía, el trabajo y el calor se hallan en el tercer nivel; en el cuarto se encuentra la entropía; la entalpía, en el quinto; y la noción termodinámica más abstracto es la energía de Gibbs, que está en el sexto nivel de esta categorización (Dixon y Emery, 1965).

Pero la Termodinámica Química no sólo es abstracta, sino también muy demandante conceptualmente (Holman y Pilling, 2004), por dos razones:

En primer lugar, porque la construcción de los nuevos significados presenta demandas cognitivas elevadas, si se atiende a las conexiones que los alumnos tienen que establecer entre los conceptos que ya existen en su memoria y los nuevos (Carson y Watson, 2002). En segundo lugar, porque el estudio de la evolución de los sistemas termodinámicos requiere un procesamiento cognitivo de alto nivel (Holman y Pilling, 2004), que suele implicar la manipulación simultánea de dos o más variables, en lo que constituye un claro ejemplo de pensamiento operacional formal (Shayer y Adey, 1986).

Sin instrucción previa al respecto, pocos estudiantes de enseñanza secundaria basan sus interpretaciones termodinámicas en las formas de razonamiento propias del pensamiento operacional formal (Watson, Prieto y Dillon, 1997). E incluso con instrucción previa, cuando se enfrentan a cuestiones complejas tienden a responder utilizando razonamientos que se encuadran en el estadio operacional concreto (Gutiérrez y Ogborn, 1992) y suelen recurrir a procesos heurísticos de tipo causal (Pozo y Gómez Crespo, 1998; Viennot, 1998; Furió y Furió-Más, 2000; Talanquer, 2005). En la resolución de las cuestiones científicas, las relaciones conceptuales que utilizan los expertos se encaminan a la identificación o el reconocimiento de las causas de los cambios que sufre el sistema, y a la justificación o predicción de los efectos que se producen; para ello se utilizan nociones y métodos propios de la Ciencia. Pero las formas epistemológicas y metodológicas del pensamiento de los estudiantes suelen responder más a los patrones culturales del pensamiento cotidiano (Furió y Furió-Más, 2000). De ahí que en general prefieran interpretar los aspectos termodinámicos de los procesos naturales basándose en las relaciones causales concretas que aprendieron fuera del ámbito escolar o durante la instrucción básica (Boo y Watson, 2001).

Por lo general, los alumnos consideran que todo proceso se puede interpretar como la actuación de un agente, casi siempre externo, que actúa sobre el sistema ya sea por contacto o a distancia a través de un medio interpuesto. Cualquier proceso físico o químico consiste en la alteración del equilibrio natural (estático) del sistema debido a la naturaleza del agente o a las causas que éste provoca (Andersson, 1986; Gutiérrez y Ogborn, 1992; Viennot, 1998).

La relación entre el agente externo y el sistema suele estar asociada a una concepción de la Dinámica de los procesos basada en la actividad del primero sobre el segundo (causalidad mecánica, según Talanquer, 2005): el agente es el responsable activo de los cambios que sufre el sistema, sujeto pasivo. Así se construyen razonamientos alternativos mediante los que se explica, por ejemplo, la reacción entre un ácido mineral y un metal. Cuando el primero reacciona con el segundo, actúa activamente sobre éste y lo disuelve; la disolución es a la vez el proceso y el efecto generado por la actividad del ácido.

Cuando no se perciben cambios macroscópicos en un sistema o no se observan agentes que lo hagan evolucionar en una determinada dirección, los estudiantes tienden a afirmar que el sistema se halla en un estado de equilibrio estable y estático tanto en lo macroscópico como en lo microscópico. La aparente ausencia de agentes causales se resuelve mediante razonamientos de tipo teleológico: dado que el sistema es un sujeto pasivo, tiende a mantenerse en el estado más estable, hacia el que se transformará si por cualquier motivo pierde las condiciones de la estabilidad. En el marco de este razonamiento teleológico, la estabilidad surge como una propiedad absoluta del ente pasivo sistema (Talanquer, 2005) que lo dirige en una dirección predeterminada. Así pues, los sistemas

evolucionan para buscar la máxima estabilidad. Un ejemplo del ámbito termodinámico: algunos sistemas experimentan procesos sin razón aparente (esto es, sin agente) porque tienden a minimizar su energía o a maximizar su entropía (Kind, 2004b; Gislason y Craig (2006).

Por este motivo, los alumnos que sostienen la visión alternativa de los procesos como efectos de la actuación de un agente activo sobre el sistema no logran interpretar procesos de dinámica compleja, como la difusión o el equilibrio químico, los cuales implican interacciones microscópicas mutuas y simultáneas y un dinamismo no direccional y, por tanto, sin posibilidad de justificación teleológica (Chi, 2005).

Si sobre el sistema concurre más de un agente responsable de cambios y/o más de una causa de cambio, y además se ha de analizar la variación de más de dos variables del sistema, los alumnos pueden tender a simplificar la cuestión utilizando razonamientos de sentido común, de poca demanda cognitiva, que facilitan la construcción de inferencias y la toma de decisiones. Estos razonamientos están basados en la intuición y en la aplicación de generalizaciones poco reflexivas a partir de la información disponible sin examinar sus fuentes ni interpretarla en profundidad. En la práctica, estas formas cotidianas de razonamiento se sustentan en métodos de análisis simplistas que disgregan, reducen o mecanizan el estudio de las relaciones causales en las que se debe profundizar para resolver problemas de base científica; la utilidad de estos razonamientos viene dada fundamentalmente por su capacidad simplificadora de los fenómenos (Driver, Guesne y Tiberghien, 1989; Pozo y Gómez Crespo, 1998; Campanario y Otero, 2000). En este sentido, Gil y Carrascosa (1985) destacan que los heurísticos relacionados con los razonamientos espontáneos de sentido común llegan a constituir una verdadera metodología de la superficialidad que los alumnos aplican para obtener conclusiones a partir de observaciones poco rigurosas, guiándose por reglas impulsivas que no contemplan la utilización de pruebas científicas ni el planteamiento de experiencias que sirvan para poner en cuestión el conocimiento con el que se trabaja o averiguar su coherencia con el resto de las ideas.

Las vías que más siguen los estudiantes cuando simplifican las relaciones causales y las variables objeto de estudio son las siguientes:

- Aplicar automáticamente una estrategia, interpretación o regla conocida que permita resolver el problema (fijación)

Los mecanismos de fijación (Furió y Calatayud, 2000; Furió, Calatayud, Bárcenas y Padilla, 2000) consisten en identificar la situación o fenómeno objeto de estudio y aplicar de forma irreflexiva o automática conceptos, reglas o estrategias conocidas, obviando sus condiciones de aplicación y sus limitaciones. Este automatismo puede afectar a las cuestiones planteadas (se utiliza la misma estrategia o fórmula para resolver cualquier problema de un tema determinado), a

los sistemas o procesos objeto de estudio (se generaliza automáticamente la aplicación de leyes o principios en condiciones en las que no son aplicables) o a los modelos y símbolos utilizados para representar los conceptos (se considera que una representación tiene una interpretación única).

- Reducir el número de variables a considerar (reducción)

La reducción es otro recurso para simplificar los problemas, mediante el cual se eliminan variables o factores relevantes (Talanquer, 2005). Los dos procesos de reducción más comunes son los siguientes:

Pueden confundirse o fusionarse varios conceptos científicos en uno solo cuyas características componen una mezcla indiferenciable, confusa e incierta. En su revisión sobre ideas alternativas y razonamientos prototípicos de los alumnos que guían sus ideas por una "intuición" afín al sentido común y cuyos principios parecen asociados al idealismo ingenuo, Talanquer (2005) recoge varias nociones científicas cuyo significado se confunde o difumina en los marcos conceptuales alternativos más comunes. Entre las reducciones conceptuales relacionadas con la Termodinámica, destacan la confusión o identificación alternativa entre calor y temperatura, muy explorada por la literatura (por ejemplo, Tiberghien, 1980); y también las relaciones ambiguas entre energía y trabajo (Driver y Warrington, 1985), así como otras que analizaremos en el apartado sobre las ideas alternativas en Termodinámica, como la identificación entre las nociones de energía interna y entalpía (Lang da Silveira, Moreira y Axt, 1991; Beall, 1994; Lang da Silveira y Moreira, 1996; Martínez y Pérez, 1997; Thomas y Schwenz, 1998; Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini, 2002), a la que se pueden añadir la entropía y la energía de Gibbs a través de la estructura alternativa de las *formas de energía*, que se presenta con mayor detalle en *La energía y sus procesos de transferencia (calor y trabajo)* (pág. 145).

Otro mecanismo de reducción muy extendido es aquél por el que se asume que los eventos o variables objeto de estudio dependen de una sola variable (Viennot, 1998). Este reduccionismo funcional se tiende a aplicar (Furió y Furió-Más, 2000) para analizar la influencia de varias causas o variables (independientes) sobre un efecto (variable dependiente). Eliminando todas las causas menos una, el problema se simplifica, y su proceso de resolución también. Por ejemplo, muchos estudiantes son capaces de reconocer que la entropía de una sustancia depende de la temperatura; pero si se les pide que analicen el valor de entropía de un gas ideal, es posible que se limiten a indicar que depende del volumen de gas, sin tener en cuenta la influencia de la temperatura del sistema (Candel Rosell, Satoca Valero y Soler Llopis, 1984).

- Establecer reglas asociativas básicas entre causas y efectos (procesos heurísticos de asociación)

Además de los mecanismos de fijación y reducción, los procesos heurísticos de asociación también simplifican el estudio de los problemas científicos utilizando razonamientos de sentido común. Consisten en la aplicación de unas reglas que asocian causas y efectos (Pozo y Gómez Crespo, 1998), y las más comunes son las de disponibilidad, asociación por covariancia, similitud, proximidad y aditividad.

La regla asociativa más intuitiva y más alejada de la Ciencia es la de disponibilidad, por la cual se tienden analizar las causas, los efectos y las variables objeto de estudio en función de su disponibilidad cognitiva, no de su relevancia en la resolución del problema. La disponibilidad cognitiva sobre causas, efectos y variables puede depender de factores relacionados con la idiosincrasia del alumno (qué recuerda, qué le parece que caerá en el examen) o con el desarrollo de las sesiones de la materia (qué tema se está estudiando, qué utilidad concreta le dan el profesor y los compañeros en la resolución de los problemas anteriores…)

La regla de asociación por covariancia establece que el efecto es un producto indefectible de la causa, independientemente de las condiciones en que suceda el cambio, y que las variables asociadas al sistema experimentan variaciones proporcionales a la intensidad, a la proximidad espacial o al tiempo de acción de la causa. Por ejemplo, los alumnos tienden a considerar que la entropía de un sistema es directamente proporcional a la temperatura.

Según la regla de similitud, la causa y el efecto comparten características comunes y por ello actúan en el mismo sentido. Un caso de asociación por similitud es el razonamiento de que la dilatación de un cuerpo sólido se debe a que las partículas del sólido aumentan de tamaño.

La regla de proximidad consiste en la asociación de eventos próximos en el tiempo y/o en el espacio. Por ejemplo, se puede explicar la aparición de gotas de agua sobre la superficie de un vaso vacío sometido a bajas temperaturas, argumentando que la superficie fría del vaso es la responsable de que el oxígeno y el hidrógeno se combinen para formar agua (Talanquer, 2005). Los alumnos tienden a aplicar esta regla cuando existe algún contacto directo entre dos sistemas o entre un sistema y el agente externo que actúa sobre él; también si se observa concurrencia temporal entre un efecto y su causa (Pozo y Gómez Crespo, 1998).

En general, cuando sobre un sistema actúa más de un efecto, los estudiantes optan por aplicar la regla de aditividad, que consiste en combinar linealmente varios efectos en uno solo, para luego distribuir éste de manera homogénea entre las diversas partes del sistema. Según esta regla, por ejemplo, cualquier mezcla de un ácido y una base es necesariamente neutra.

- Construir una secuenciación lineal de las causas y efectos, de manera que el problema se reduzca a la sucesión o progresión de problemas más simples (razonamiento causal lineal).

En el tratamiento de procesos que implican cambios en el valor de dos o más variables (lo que requiere análisis holísticos bastante complejos), también es muy común la elaboración de razonamientos causales lineales (Rozier y Viennot, 1991). Mediante éstos se analizan paso a paso los cambios en las variables del sistema en una secuencia de relaciones causa-efecto sencillas, y de esta manera se simplifican los problemas científicos y se llega a interpretar situaciones complejas desde el nivel operacional concreto (Gutiérrez y Ogborn, 1992). Cada etapa de la secuencia causal se basa en la idea de que es un único agente el que actúa sobre el sistema, y en consecuencia una sola de las variables cambia en cada paso. La secuencia lineal se construye aplicando reglas de contigüidad temporal o espacial a los sucesivos pasos causales. Así se resuelven problemas científicos sin eliminar variables objeto de estudio, al mismo tiempo que se evitan análisis holísticos que implicarían un tratamiento multivariable simultáneo, propio del pensamiento operacional formal. El nivel de elaboración de los esquemas causales aumenta con el desarrollo cognitivo del individuo. Por ejemplo, se pueden analizar mediante razonamientos lineales las variaciones simultáneas de temperatura, presión y volumen a las que se somete un gas ideal (Rozier y Viennot, 1991).

Si a partir de un razonamiento basado en el causalismo simple (Andersson, 1990) se logra articular un razonamiento causal lineal con el que se procesan las variables más relevantes, el alumno puede construir justificaciones y predicciones aplicables a numerosos fenómenos físicos (Andersson, 1986), y entre ellos a los aspectos energéticos de las reacciones químicas. Por ejemplo, la formación de enlaces químicos puede interpretarse como una actuación del agente energía sobre los átomos del sistema (Boo y Watson, 2001). Cachapuz y Martins (1987) detallan un razonamiento causal lineal de mayor profundidad: algunos estudiantes de 17 años describen las reacciones endotérmicas como procesos que tienen lugar en dos etapas, una primera que implica una absorción de energía mediante la cual se hace posible la ruptura de enlaces químicos, y una segunda en la que se produce una liberación de energía como consecuencia de la formación de nuevos enlaces.

El tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas

A las fuentes de la problemática de aprendizaje en Termodinámica hemos de añadir otra: el tratamiento matemático necesario para la resolución de problemas científicos. Los mayores obstáculos no se deben tanto al manejo deficiente de los constructos y el lenguaje matemáticos como a la concepción epistemológica de las Matemáticas (Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993) y a la falta de comprensión de los conceptos y teorías científicas, aunque los alumnos sean capaces de manipular adecuadamente las expresiones matemáticas y operar con ellas. Una comprensión deficiente de los constructos de la Química impide resolver problemas de base química, por mucho énfasis que dediquen el *curriculum*, los libros de texto y los profesores a adiestrar al alumnado en la realización de ejercicios mecánicos (Nuremberg y Pickering, 1987; Nakhleh y Mitchell, 1993; Gabel y Bunce, 1994).

En lo que respecta a la concepción de las Matemáticas como el "lenguaje de la Ciencia", Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok (1993) señalan que es un problema muy arraigado en la enseñanza, hasta el punto de que libros de texto y profesores definen los conceptos científicos mediante expresiones matemáticas. LaTermodinámica no constituye una excepción en esto, más bien al contrario: muchos textos académicos no utilizan más que ecuaciones matemáticas para definir, interpretar y procesar algunas magnitudes termodinámicas (Barlet y Mastrot, 2000; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002), de tal manera que si los docentes guían el proceso de aprendizaje utilizando únicamente estos libros y las recomendaciones didácticas que los acompañan, los estudiantes no trabajarán durante la instrucción con las definiciones científicas de los constructos en los que se pretende que basen sus interpretaciones de los aspectos energéticos de los procesos naturales.

También se han descrito algunas dificultades relacionadas con la comprensión conceptual de las relaciones matemáticas que se aplican en el estudio energético de los procesos físicos y químicos. Por ejemplo, (Carson y Watson, 1999) han explorado las ideas de los alumnos sobre la ecuación que relaciona la variación de la entalpía de un sistema con la variación de energía interna ($\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V$) Hadfield y Wieman (2010) se han centrado en la ecuación que relaciona las transferencias energéticas sistema-entorno con la variación de la energía del sistema, o ecuación fundamental de la Termoquímica: $\Delta U = q + w$. De ambos estudios se concluye que la comprensión de estas expresiones es prácticamente nula aunque los estudiantes conozcan de memoria la simbología y operen correctamente con estas expresiones para resolver ejercicios mecánicos. De hecho, prefieren centrarse en estos aspectos algorítmicos en vez de construir los conceptos y modelos científicos (Barlet y Mastrot, 2000). Cuando se les pide que resuelvan una cuestión de base científica, tienden a "refugiarse" en estos procedimientos matemáticos y los aplican de manera mecánica para reducir la respuesta a un número que se obtiene poniendo en juego solamente destrezas básicas de operación con algoritmos.

Tanto en estas investigaciones como en Carson y Watson (2002), los autores afirman que los problemas de comprensión se se perpetúan por el excesivo énfasis que se da en la enseñanza tradicional al dominio de técnicas mecánicas para operar con datos numéricos a los que no se dota de significado. Este enfoque de instrucción (o más bien de adiestramiento) excesivamente formalista (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2007) promueve el aprendizaje memorístico de las expresiones matemáticas y las técnicas necesarias para operar con ellas, porque su objetivo primordial alcanzar un nivel alto de eficiencia en la realización del cálculo y en la obtención de resultados numéricos "correctos" (Barlet y Mastrot, 2000).

La instrucción tradicional tiene dos consecuencias desfavorables para el aprendizaje significativo de la Termodinámica (Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002): en primer lugar, la construcción del conocimiento termodinámico queda relegado a servir de complemento a los cálculos con los que se obtienen los números

que se consideran la solución correcta a los ejercicios. Además, promueve una manipulación automática de la simbología matemática, sin reflexionar sobre las estrategias de resolución más útiles o más precisas, ni sobre su validez en los distintos casos y contextos. Por otra parte, el enfoque tradicional no necesariamente ayuda a aprender con éxito los procesos heurísticos que se consideran básicos en la obtención de resultados numéricos, ni el significado y propiedades de las entidades matemáticas. De hecho, no son pocos los alumnos que tienen dificultades para distinguir entre una magnitud y la variación de la magnitud entre dos estados, o para trabajar con la simbología de los parámetros y variables. Un ejemplo: entre los alumnos universitarios cuyas ideas analizaron Sreenivasulu y Subramaniam (2013), un 16% de la muestra utilizó las unidades de grado Celsius para expresar el valor de temperatura en la ecuación fundamental de la Termodinámica.

En resumen, la enseñanza basada en la resolución de ejercicios numéricos puede resultar desmotivadora e irrelevante, sobre todo si previamente no se ha realizado un aprendizaje significativo de los constructos científicos (Gillespie, 1997; Barlet y Mastrot, 2000). Un ejemplo prototípico es la enseñanza de la energía de Gibbs, la magnitud que casi todos los libros de texto definen mediante una expresión matemática poco significativa para el alumnado: $G = H - T \cdot S$. Por lo general, los profesores presentan esta expresión y en seguida pasan al adiestramiento en la manipulación de la ecuación fundamental de la Termodinámica, que según los libros de texto es la definición de ΔG (Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002): $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$. Con frecuencia, al terminar el tema de Termodinámica los alumnos no han tenido siquiera oportunidad de conocer el significado de esta ecuación, aun cuando se hayan dedicado varias sesiones de clase a manipularla para obtener resultados numéricos. La situación se agrava si sucede lo que revelan algunos trabajos centrados en los problemas de aprendizaje asociados a los prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica (por ejemplo, Harrison y Treagust, 2000a; Sözbilir, 2002): en general existen grandes lagunas en los conocimientos que se supone que el alumnado debería haber construido en cursos anteriores. Los investigadores señalan la enseñanza tradicional como la responsable directa de este fracaso, porque ésta no se esfuerza en diagnosticar las concepciones iniciales de los estudiantes y tiende a eliminar los incentivos y ocasiones para construir los significados de los conceptos y modelos científicos.

Desde la literatura científica en Didáctica de las Ciencias se aboga por erradicar de las aulas esta perspectiva mecanicista que caracteriza la enseñanza tradicional, y adoptar posturas coherentes con los enfoques constructivistas. Nosotros, además de los autores citados y de muchos otros (por ejemplo, Teichert y Stacy, 2002; Greenbowe y Meltzer, 2003; Niaz, 2006), consideramos que la comprensión de los constructos científicos debe preceder a la manipulación algorítmica de las relaciones conceptuales. Si se pretende ayudar a los alumnos a construir un conocimiento cuyos principales atributos sean su carácter funcional y

su aceptación racional y no dogmática, se debe rechazar la presentación algorítmica de la Termodinámica, que puede representar un obstáculo adicional en el aprendizaje, al desplazar o eclipsar la comprensión de los conceptos y métodos de la Ciencia (Barlet y Mastrot, 2000) a favor de razonamientos basados en la fijación funcional (Furió y Calatayud, 2000; Furió, Calatayud, Bárcenas y Padilla, 2000).

En cuanto a la profundidad con la que se debe desarrollar el lenguaje matemático aplicable a la Termodinámica en la enseñanza secundaria, parece que en la literatura no se ha alcanzado un consenso al respecto:

Por un lado, los autores que realizan aportaciones en revistas técnicas como *Journal of Chemical Education* (por ejemplo, Bergquist y Heikkinen, 1990) consideran que en la enseñanza se tratan con poco rigor matemático las fórmulas y ecuaciones, y defienden el incremento del nivel de complejidad simbólico y de cálculo mediante la introducción de operadores más formales y los métodos de derivación e integración. Por el contrario, los autores que publican en revistas de perfil más didáctico advierten que no es un objetivo de los cursos introductorios de Ciencias el construir una matematización rigurosa de los conceptos científicos y que, a la vista de las dificultades de aprendizaje que se han detectado, incrementar el rigor de las expresiones matemáticas podría añadir más obstáculos al aprendizaje de los conceptos, modelos y procedimientos de la Termodinámica (Ochs, 1996).

Los prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica

También tienen un impacto significativo en el aprendizaje de la Termodinámica las ideas que los alumnos desarrollaron en sus primeros cursos de Química sobre los constructos científicos que son prerrequisitos conceptuales para entender los aspectos energéticos de los procesos naturales (Cohen y Ben-Zvi, 1992; Boo H. K., 1998; Carson y Watson, 2002). El aprendizaje de la Termodinámica está notablemente influido por los conocimientos previos acerca de los sistemas materiales y su estructura y propiedades, las interacciones entre partículas, los procesos químicos, y la naturaleza de la energía y sus transferencias calor y trabajo.

A lo largo de los apartados siguientes se comentan las dificultades de aprendizaje más destacadas que se han detectado en relación con cada uno de estos prerrequisitos conceptuales de la Termoquímica y la Termodinámica Química.

La materia y su estructura. Las sustancias químicas

Ya hemos comentado que los estudiantes suelen tener dificultades para integrar los aspectos macroscópicos y los microscópicos cuando elaboran explicaciones sobre la materia y sus propiedades (Furió y Furió-Más, 2000).

La literatura ha puesto de manifiesto numerosas ideas alternativas y dificultades de aprendizaje relacionadas con la construcción de interpretaciones del dominio microscópico. Entre las publicaciones más destacadas cabe citar las que recogen las ideas del alumnado sobre la naturaleza corpuscular de la materia

(Novick y Nussbaum, 1978, 1981; Brook, Briggs y Driver, 1984; Gabel, Samuel y Hunn, 1987), o los conceptos de sustancia química (Sanmartí y Izquierdo, 1995; Furió y Furió-Más, 2000) y elemento y compuesto químico (Kind, 2004a).

En su revisión de un centenar de publicaciones relacionadas con el desarrollo del concepto de materia a lo largo de la infancia, Krnel, Watson y Glaser (1998) señalan que muchas ideas alternativas en este ámbito están establecidas a partir de patrones de razonamiento similares al causal lineal. Se constata una clara tendencia a omitir la estructura microscópica de la materia en la explicación de los fenómenos químicos, y se observan problemas para construir un modelo cinético corpuscular de la materia (Duschl, 1995; Domínguez Castiñeiras, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1998a). El porcentaje de estudiantes que utiliza consistentemente un modelo de partículas varía bastante con la edad, y entre distintas muestras pertenecientes a un mismo rango de edad se aprecian grandes diferencias de resultados entre unas investigaciones y otras. Por ejemplo, con adolescentes de 13-14 años, (Novick y Nussbaum, 1978) detectan que el porcentaje de los estudiantes que utilizan el modelo de partículas sólo alcanza el 60%, mientras que Brook, Briggs y Driver (1984) y Benarroch (1989) documentan unas frecuencias de entre un 70% y un 80%.

Las principales características de los modelos de partículas elaborados por el alumnado para interpretar los fenómenos naturales están descritas en el trabajo de Benarroch, Marín y Perales (1999). Según estos autores, se pueden distinguir cinco modelos explicativos sobre la naturaleza corpuscular de la materia, y entre ellos se aprecia una clara evolución unidimensional de los razonamientos:

Los niños de edades muy tempranas comienzan con una idea de la materia como un *continuum* puramente macroscópico que explica las características de las entidades materiales tal y como las percibimos (Pozo y Gómez Crespo, 1998). Ya utilizan ideas pre-atomísticas para construir explicaciones sobre la estructura de la materia, y aluden a entidades corpusculares como granos, polvo, trozos… Sin embargo, solamente se construye un modelo corpuscular propiamente dicho en el estadio de las operaciones formales, cuando se admiten las ideas relacionadas con entidades no perceptibles por los sentidos (Marín y Benarroch, 1994). A partir de ahí, el modelo material se acerca gradualmente a los modelos deseables de la ciencia escolar, incorporando las nociones microscópicas de partícula, vacío, movimiento e interacción entre partículas; éstos son los tres modelos intermedios. Sin embargo, el quinto modelo conocido, el más avanzado, no llega a incluir todas las ideas que se pretenden construir desde la ciencia escolar, y se constatan más dificultades sobre las de vacío y movimiento de las partículas (Novick y Nussbaum, 1981). En general, los alumnos se resisten a aceptar que las partículas se mueven en el vacío (*horror vacui*). Para ellos, en medio de los átomos o moléculas tiene que haber alguna sustancia; así, por ejemplo, creen que las partículas de un gas se desplazan en el aire (Domínguez, De Pro y García, 1998b).

Sobre el concepto de sustancia, se observa que los estudiantes tienden a describir los materiales según sus características perceptibles o sus utilidades; si unas y otras se convierten en propiedades específicas, buscarán explicaciones "sustancializadoras" que den cuenta de ellas (Sanmartí y Izquierdo, 1995). Por ejemplo, para decidir si un tipo de material se conserva o no en un proceso, pueden utilizar como criterio principal los cambios que se producen en alguna propiedad específica del material (Furió y Furió-Más, 2000). A través de estos razonamientos que convierten la materia en agente portador de propiedades, se confunden los conceptos de compuesto químico y mezcla (Sanmartí y Izquierdo, 1995).

En la enseñanza tradicional suele relativizarse el concepto de sustancia. Se subraya la clasificación de los materiales en mezclas homogéneas y heterogéneas atendiendo a criterios perceptibles, y se insiste en el reconocimiento y caracterización de los materiales de acuerdo con algunas propiedades cualitativas observables como el color, el olor, el sabor, el origen natural o artificial, las utilidades en las que se emplea, etc. En cambio, no se trabaja explícitamente la relación que existe entre estas características macroscópicas de las sustancias químicas y las partículas que constituyen las sustancias (Johnstone, 1993).

Además, la enseñanza tradicional no sale al paso de los problemas conceptuales relacionados con las definiciones y clasificaciones de las sustancias (Furió y Furió-Más 2000). En el aula, se debe establecer claramente el significado que adopta la palabra "sustancia" en el contexto cultural de la Ciencia. Se debe ayudar a los alumnos a diferenciar explícitamente la sustancia del material o el producto observable, para evitar que desarrollen un concepto macroscópico de sustancia química que sea sinónimo del concepto cotidiano de material. Parece que la identificación de las sustancias químicas con los materiales es el origen de la idea alternativa de que los componentes de cualquier material son necesariamente sustancias puras. Esta visión tiene algunas similitudes con la perspectiva ontológica de la filosofía natural griega (Furió y Furió-Más 2000), si bien los antiguos estudiosos de la *physis* abordaban esta cuestión desde un punto de vista metafísico: los cuatro elementos primordiales de Empédocles eran sustancias abstractas, no reales, que representaban las propiedades observables de la materia.

Todas estas ideas alternativas sobre la naturaleza de la materia y sus propiedades se traducen en dificultades para comprender los cambios químicos (Hesse y Anderson, 1992), para diferenciarlos de los cambios físicos y para aceptar la idea de la conservación de la masa en los procesos (Stavy, 1990a).

La literatura constata que se consigue una construcción muy pobre de los conocimientos termodinámicos si solamente se recurre a los experimentos calorimétricos y a las descripciones y explicaciones macroscópicas, sin introducir un modelo microscópico que aporte mayor capacidad justificativa y predictiva a las ideas de la Termodinámica Clásica (Missoni, 1985). La introducción de los modelos

corpusculares en la enseñanza secundaria no es descabellada, porque numerosos estudios realizados desde los años 80 demuestran que la mayoría de los alumnos de 12-13 años es capaz de utilizar modelos cinéticos moleculares sencillos para interpretar fenómenos térmicos como el aumento de temperatura del sistema o, en menor extensión, la disminución de la temperatura (Mitchell y Kellington, 1982), la dilatación de los cuerpos (Domínguez, García-Rodeja, Illobre, Castro Fucci, García y Rocha, 1995; Domínguez Castiñeiras, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1998a; Domínguez, De Pro y García, 1998b) y la presurización/despresurización de gases (Séré, 1991; Domínguez, García-Rodeja, Illobre, Castro Fucci, García y Rocha, 1995). Se presentan mayores dificultades para aplicar un modelo cinético molecular a los fenómenos que ocurren en sistemas sólidos o líquidos, porque los alumnos recurren a un modelo corpuscular estático según el cual las partículas están en reposo cuando la temperatura es baja (Domínguez Castiñeiras, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1998a) y, al incrementarse la temperatura, se mueven hacia la periferia del sistema y allí se quedan en reposo (Nussbaum, 1989). Por este motivo, para muchos estudiantes las partículas de los sólidos no se mueven en absoluto, y las de los líquidos, solamente cuando el líquido se agita.

Desde los años 80, muchos autores (Brook, Briggs y Driver, 1984; Nussbaum, 1989; Domínguez, De Pro y García, 1998b, Domínguez, 2000, 2001, Domínguez *et al*., 2001) están decididos a trabajar los modelos corpusculares de la materia en los primeros cursos de Ciencias, con el objetivo de ayudar a los alumnos a interpretar fenómenos como los cambios de temperatura, presión y volumen, los cambios de estado de agregación y otros procesos termodinámicos sencillos.

Las interacciones químicas

Existe una abundante literatura dedicada a explorar las ideas alternativas y dificultades en la construcción de conocimientos sobre el enlace químico (Taber, 1996; Tan y Treagust, 1999; Harrison y Treagust, 2000b; Coll y Treagust, 2001b; Eshach, 2001; Nicoll, 2001; Ünal, Çalik, Ayas y Coll, 2006). Algunos autores se centran en la conceptualización de un tipo concreto de interacciones, ya sean los enlaces iónicos (Taber, 1994; Coll y Treagust, 2003), los covalentes (Peterson, Treagust y Garnett, 1989) o metálicos (de Posada, 1999); es menor el número de publicaciones que recogen las ideas sobre otras interacciones químicas, como las fuerzas intermoleculares (Ünal, Çalik, Ayas y Coll, 2006); varios exploran los modelos mentales que construyen los alumnos para interpretar las interacciones entre partículas (Coll y Treagust, 2001a, 2003; Coll y Taylor, 2002; Taber, 2003). En el marco de la investigación que nos ocupa, nos interesan los estudios dedicados al análisis de las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje sobre los aspectos energéticos de las interacciones químicas (por ejemplo, Hapkiewicz, 1991; Boo, 1998; Barker y Millar, 2000; Teichert y Stacy, 2002; Kind, 2003, 2004b; Galley, 2004); pero las incluiremos en el apartado dedicado a las ideas alternativas en Termoquímica y Termodinámica Química (*Las interacciones químicas*, pág. 139).

Muchas ideas alternativas sobre las interacciones químicas se deben a las dificultades que se han comentado respecto a la naturaleza corpuscular de la materia (*La materia y su estructura. Las sustancias químicas*, pág. 136). Un ejemplo: para muchos estudiantes, los electrones que se implican en un enlace químico están fijos e inmóviles en el espacio que queda entre los átomos enlazados (Nicoll, 2001).

Los problemas para elaborar razonamientos sobre las propiedades de la materia en términos de partículas e interacciones entre partículas (Duschl, 1995) aumentan cuando se trata de interpretar los procesos físicos o químicos utilizando los modelos de enlace químico (Ben-Zvi, Eylon y Silberstein, 1987), y más teniendo en cuenta que los alumnos apenas son conscientes de la naturaleza electrostática del enlace químico (Boo, 1998). No es infrecuente que la interpretación de la estructura química de la materia mediante el enlace químico se reduzca a la aplicación mecánica de la regla del octeto (Coll y Treagust, 2001b), en lo que constituye un claro caso de fijación funcional. Parece que el "marco del octeto" es un marco conceptual alternativo que se aplica a todos los tipos de enlace (Taber, 2003).

Parte de las ideas alternativas sobre los enlaces químicos, y en especial aquéllas que tienen que ver con sus aspectos energéticos, surgen de dificultades ontológicas (Chi, 1992; Chi, Slotta y De Leeuw, 1994) y, en particular, de la visualización de las interacciones químicas como objetos, pertenecientes a la categoría ontológica de materia, en lugar de procesos pertenecientes a la categoría de interacciones basadas en restricciones (*constraint-based interactions*). Según los investigadores que han explorado los aspectos ontológicos (Chi, 1992; Chi, Slotta y De Leeuw, 1994), las entidades estudiadas por la Ciencia se clasifican en tres categorías ontológicas: materia, procesos (procedimientos, eventos e interacciones) y abstracciones o estados mentales. Las entidades de cada categoría ontológica comparten entre sí determinados atributos que las diferencian ontológicamente de las entidades de las demás categorías. Un atributo ontológico es una propiedad que una entidad podría potencialmente tener como consecuencia de pertenecer a una categoría ontológica determinada. Los atributos asociados a la categoría ontológica adecuada para una entidad permiten formar enunciados con sentido cuando se utilizan como predicados del sujeto entidad. Pero ha de tenerse especial cuidado con la expresión lingüística:

En ocasiones, los científicos y los docentes utilizan expresiones figuradas que dificultan la asignación de la categoría ontológica mediante la construcción de predicados a partir de los atributos ontológicos de la entidad. Por ejemplo, el enlace químico consiste en una interacción entre partículas, y por tanto pertenece a la categoría de procesos. Sin embargo, en la jerga de los químicos son frecuentes las expresiones como "los enlaces se forman y se rompen", predicados perfectamente compatibles con una concepción materialística de los enlaces como objetos que se "forman" o ensamblan al unir las piezas atómicas, y que se "rompen" (se fragmentan o desmoronan) cuando las piezas ensambladas se separan. La

sustitución de la expresión "se forman" por "se establecen" da una idea más precisa de la naturaleza de los enlaces químicos como procesos: un objeto, como un bolígrafo, no "se establece". Pero, nuevamente, con la entidad bolígrafo también se podrían construir predicados propios de los procesos: un proceso "dura" hasta que "se termina", y tiene sentido decir "este bolígrafo no te durará mucho si malgastas la tinta en hacer tachones", o "se me ha terminado [la tinta d]el bolígrafo".

Desde el punto de vista de la ciencia escolar, las interacciones entre partículas son procesos; pero muchos alumnos las conciben como uniones físicas entre las partículas del sistema (Boo y Watson, 2001) y por lo tanto convierten los enlaces químicos en entidades de la categoría ontológica de materia. En este mismo sentido la energía puede considerarse también una entidad *quasi*-material que se debe de localizar en algún lugar *físico* del enlace químico.

Tras más de una década explorando las posibilidades de cambio conceptual para las ideas alternativas que se basan en una clasificación ontológica errónea (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994; Chi, 2005), se ha comprobado que el cambio dentro de una categoría ontológica es mucho más fácil que el cambio entre categorías ontológicas, porque la asignación de una categoría inadecuada supone un obstáculo adicional a los relacionados con el grado de abstracción del concepto o con la expresión matemática del mismo. Para recategorizar ontológicamente una entidad se necesita sustituir sus atributos por otros nuevos mediante un proceso de reflexión profunda que requiere operaciones del pensamiento formal. Si se tienden a sustancializar interacciones, procesos, propiedades y entidades abstractas, llegar a visualizarlas como sustancias o como propiedades de objetos materiales (Sanmartí e Izquierdo, 1995, Talanquer, 2005) supone un cambio de perspectiva ontológica que implica la superación del la tendencia sustancialista y/o esencialista.

Los procesos químicos

La enseñanza del concepto de reacción química suele comenzar con la definición del cambio químico. A continuación se aplica la noción de enlace químico para interpretar los cambios de composición que experimentan las sustancias químicas; y solamente después de desarrollar estas ideas se da la posibilidad de predecir los cambios que tendrán lugar en los sistemas como consecuencia de las reacciones químicas, al introducir la perspectiva termodinámica (Boo, 1998). Paralelamente a esta construcción del concepto de reacción química, se observa que los alumnos hacen evolucionar sus ideas a lo largo de tres modelos diferentes sobre los cambios químicos, de menor a mayor nivel de complejidad:

Primero se desarrolla una concepción de las reacciones químicas como eventos cuya interpretación se basa en la descripción de manifestaciones fenomenológicas. Este modelo, muy elemental, está alejado de la ciencia escolar. Después, los estudiantes integran la idea de formación de nuevas sustancias a partir de las originales, y la concepción de la reacción química pasa a estar basada en la

transformación sustancial; pero el criterio para reconocer la transformación suele responder a la observación de cambios macroscópicos (Caruso *et al.*, 1998). El modelo más avanzado de reacción química es el que articula conocimientos del dominio microscópico para interpretar las transformaciones que experimenta el sistema (Stavridou y Solomonidou, 1998). Sin embargo, aun utilizando nociones microscópicas, lo más frecuente es que los alumnos no lleguen a relacionar los cambios fenomenológicos que observan con la evolución microscópica del sistema.

En las últimas décadas, se ha dedicado un gran esfuerzo a indagar en las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje relacionadas con el cambio químico y, como resultado, se han obtenido fructíferos resultados en este campo: (Andersson, 1984; Andersson, 1986; Ben-Zvi, Eylon y Silberstein, 1987; Llorens, 1991; Hesse y Anderson, 1992; Stavridou y Solomonidou, 1998; Caruso *et al.*, 1998; Solsona y Izquierdo, 1999; Barker, 2000; Barker, 2001; Boo y Watson, 2001; Kind, 2002a, 2002b; Solsona, Pla, Izquierdo y de Jong, 2003).

La mayor parte de las ideas de los alumnos sobre los cambios físicos y químicos tienen mucho que ver con la aplicación de las características del pensamiento espontáneo (Furió y Furió-Más, 2000) sobre las concepciones alternativas de sustancia y compuesto químico, ya comentadas (*La materia y su estructura. Las sustancias químicas*, pág. 136). Nuevamente, se constatan en todos los niveles educativos la adscripción de propiedades macroscópicas a las partículas y la desconexión de las ideas macroscópicas de material y sustancia con respecto a las microscópicas de átomo, molécula e ion (Beall, 1994).

Los estudiantes suelen centrar su atención en aquellas propiedades del sistema que cambian, no en las que permanecen (Pozo y Gómez Crespo, 1998), y como consecuencia tienden a describir las transformaciones, no los estados (Martínez y Pérez, 1997). Ésta es una de las principales dificultades que se presentan a la hora de construir un modelo adecuado sobre los aspectos energéticos asociados a los procesos químicos.

Las investigaciones de los últimos treinta años revelan que muchos alumnos tienen una noción confusa, fragmentaria e inconexa sobre los cambios químicos, dependiendo en gran medida de los aspectos perceptibles del fenómeno (BouJaoude, 1991) y en general de la naturaleza y contexto del problema que se les plantea; sin un esquema integrado de conocimiento, parecen ir construyendo interpretaciones improvisadas sobre un marco conceptual pobre formado por fragmentos aislados de conocimiento (Talanquer, 2005). Por ejemplo, en el caso de las combustiones, la observación de diferentes cambios en distintos sistemas y la percepción desigual de la temperatura influyen en la variedad de interpretaciones que se generan: algunas combustiones son cambios químicos, otras son cambios de estado, o disoluciones; también hay destrucciones y desapariciones de los reactivos, o transformación en gas y energía (Watson, Prieto y Dillon, 1997).

En ocasiones, los alumnos interpretan las reacciones químicas utilizando ideas que resultarían más apropiadas para describir y explicar los procesos físicos (Meheut, Saltiel y Tiberghien, 1985; Andersson, 1986; Stavridou y Solomonidou, 1989; Abraham *et al.*, 1992; Hesse y Anderson, 1992; Krnel, Watson y Glaser, 1998). Al basar sus interpretaciones en estímulos perceptibles, el criterio para concluir si un proceso es físico o químico suele ser la observación de cambios en las propiedades cualitativas observables, y en especial el color o el estado de agregación del sistema. Si en el cambio químico intervienen gases o sustancias poco familiares, el número de interpretaciones alternativas crece notablemente. Las respuestas dependen de la experiencia personal del estudiante y del tipo de pregunta planteada, pero en general todas se apoyan en un modelo alternativo según el cual la estructura de la materia se caracteriza por ser continua, estática y sin vacío entre las partículas (Pozo y Gómez Crespo, 1998; Furió y Furió-Más, 2000). Es evidente que este modelo no permite explicar adecuadamente los procesos naturales y dificulta la interpretación de los efectos de las variables termodinámicas básicas (temperatura, presión, densidad…) sobre el sistema (Pozo y Gómez Crespo, 1998).

En lo que se refiere a la construcción de la naturaleza de la reacción química, se exploró con bastante interés en los años 80 (Andersson, 1986; Cachapuz y Martins, 1987; Ben-Zvi, Eylon y Silberstein, 1987; Andersson, 1990). Las principales ideas alternativas sobre esta cuestión son las siguientes:

En general, los alumnos tienen muchas dificultades para ver el cambio químico como el resultado de una interacción entre sustancias químicas. Según Andersson, (1990), solamente el 2% de los que tienen entre 12 y 16 años manifiesta esta idea acorde con la ciencia escolar (incluyendo los modelos atómicos más sencillos asimilables con el de Dalton). En su lugar existe una gran variedad de interpretaciones alternativas entre las que se incluyen la desaparición de las sustancias iniciales o su desplazamiento a otro lugar, la modificación de los reactivos (o bien en su apariencia o propiedades, pero con mantenimiento de su identidad, o bien por transmutación del material original en otro que no guarda ninguna relación con él); algunos alumnos consideran el cambio químico como una conversión de materia en energía o de energía en materia (Andersson, 1990).

Estas ideas están presentes también en estudiantes de Magisterio, según las encuestas que hicieron Furió y Furió-Más (2000). Pero la idea alternativa más explorada sobre la reacción química es la que atribuye la autoría de la transformación del sistema al *reactivo principal*, que es un agente activo y como tal actúa sobre las otras sustancias, pasivas (Cachapuz y Martins, 1987). Según este tipo de razonamientos, a los que Andersson, (1986) denominó carácter experiencial de la causalidad (*the experiential gestalt of causation*), las reacciones químicas se visualizan como procesos aditivos, en el sentido de que los reactivos se agregan unos a otros para formar productos que no son nuevas entidades químicas, sino una mezcla de sus constituyentes (Ben-Zvi, Eylon y Silberstein, 1987; Furió y Furió-Más, 2000). Por

ejemplo, las moléculas de O_2 se adicionarían a las de H_2 para formar, al mezclarse, moléculas de agua.

También existen dificultades de aprendizaje asociadas a las representaciones de los procesos químicos, y, en particular, a las ecuaciones químicas (Yarroch, 1985; Ben-Zvi, Eylon y Silberstein, 1987; Gómez Crespo, 2008). Pocos alumnos llegan a visualizarlas como una representación simbólica de un proceso dinámico e interactivo; la mayoría se limita a considerarlas ecuaciones matemáticas que no aportan información sobre los aspectos estructurales del cambio químico, y solamente sirven para realizar cálculos estequiométricos (Nakhleh, 1992). En ocasiones, la noción de reacción pierde todo su significado químico por confundirse o identificarse con la ecuación química hasta el punto de que la segunda se convierte en sinónimo de la primera e incluso la sustituye. De esta manera, los cambios químicos se ven reducidos a una expresión meramente cuantitativa (Rocha, 2008) cuya característica principal es la capacidad de producirse hasta que las sustancias se han consumido, o bien en proporciones másicas sencillas 1:1, 1:2…, o sin guardar ningún tipo de proporción (Pozo, 1988). Como casi todas las ecuaciones químicas con las que se trabaja en las aulas tienen el esquema fijo de dos reactivos que dan lugar a uno, dos o tres compuestos, algunos estudiantes consideran que una reacción química solamente puede tener lugar si se produce entre dos reactivos (Caruso *et al*., 1998; Stavridou y Solomonidou, 1998). En el apartado *El tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas* (pág. 133) ya hemos comentado la tendencia a refugiarse en el uso de algoritmos para evitar la conceptualización de los constructos científicos; en el caso de la manipulación de ecuaciones químicas, que solamente involucra operaciones de la aritmética más básica, los estudiantes suelen sentirse cómodos operando con la estequiometría. Por ejemplo: en la presente investigación, bastantes de los alumnos de 2º de Bachillerato que constituyeron la muestra declararon que lo que más les gusta de la Química es formular sales inorgánicas y compuestos orgánicos, y hacer balances estequiométricos de las ecuaciones químicas, porque estas tareas son fáciles y entretenidas, y en ellas "todo encaja" (en palabras de Alfonso). La realización mecánica de los cálculos estequiométricos puede convertirse en un mecanismo de fijación funcional muy útil, porque reduce la interpretación de las reacciones químicas (procesos dinámicos que tienen lugar partícula a partícula, mol a mol) a la resolución de simples ecuaciones de primer grado con una incógnita.

Analizar las ideas alternativas sobre el cambio químico en el marco de las categorías ontológicas de Chi es difícil (Boo y Watson, 2001), porque muchos alumnos no llegan a desarrollar un modelo embrionario sobre las reacciones químicas y se limitan a describirlas como procesos inexplicables, impredecibles (Boo, 1998) o rayanos en lo mágico. Posiblemente, estas dificultades surgen de (y se apoyan en) los enfoques tradicionales de la enseñanza de la Química, donde las interpretaciones microscópicas se introducen varios cursos después de los aspectos

fenomenológicos. Si los estudiantes no pueden interpretar los procesos químicos mediante los conocimientos del dominio microscópico, desarrollan concepciones alternativas sobre el cambio químico. Después de años madurando estas ideas y comprobando su utilidad para el contexto escolar, llega el momento en que se introducen los aspectos energéticos de las reacciones; pero en este punto ya se han desarrollado todas las condiciones para la *hipótesis de incompatibilidad* (Chi, 1992; Chi, Slotta y De Leeuw, 1994): los nuevos conocimientos, que deberían facilitar la construcción de las reacciones químicas como procesos dinámicos de cambio, ya no resultan inteligibles o plausibles para el alumnado porque no son compatibles con las ideas alternativas que les han sido útiles hasta entonces.

La energía y sus procesos de transferencia (calor y trabajo)

Cuando se interpretan los cambios que experimentan los sistemas durante los procesos termodinámicos, es casi inevitable referirse a los mecanismos por los que se transfiere la energía con el entorno. Estos mecanismos de transferencia, el calor y el trabajo, están entre los más estudiados en la literatura de la Didáctica de las Ciencias, por varios motivos: en primer lugar, porque muchas de las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje que se han detectado en el ámbito de la Termodinámica de los procesos físicos y químicos están relacionadas con estos conceptos; en segundo lugar, porque las relaciones entre la energía, el calor, el trabajo y las variables termodinámicas principales resultan difíciles de construir aun para los expertos y, de hecho, todavía no existe una definición consensuada de energía que concilie las varias definiciones que se manejan; en tercer lugar, porque la controversia epistemológica sobre la naturaleza de la energía y de sus mecanismos de transferencia se ha traducido en una polémica sobre la conveniencia y/o necesidad de eliminarlos de la enseñanza.

La bibliografía sobre las dificultades de aprendizaje en el tema del calor y su relación con la energía de los sistemas y con la temperatura es mucho más prolífica que la dedicada al trabajo (de expansión, eléctrico…) Ya en los años ochenta se publicaron revisiones exhaustivas sobre los obstáculos de aprendizaje en la construcción del calor y la temperatura (Erickson, 1979, 1980, 1989; Summers, 1983; Carrascosa, 1985; Hierrezuelo y Montero, 1987, 1988; Vázquez Díaz, 1987). También hay revisiones que datan de la década de los noventa (van Roon, van Sprang y Verdonk, 1994; Bacas, 1997; Watson, Prieto y Dillon, 1997; Domínguez, De Pro y García, 1998b; Harrison, Grayson y Treagust, 1999). Y en la última década se han realizado nuevas aportaciones a este tema: (Domínguez Castiñeiras, 2000; Niaz, 2000; Taber, 2000; Cervantes, de la Torre, Verdejo, Trejo, Córdova y Flores, 2001; Odetti *et al.*, 2001; Laburu y Niaz, 2002; Bañas Sierra, Mellado Jiménez y Ruiz Macías, 2003; Meltzer, 2004; Paik, Cho y Go, 2007).

Las concepciones de calor y temperatura alejadas de la ciencia escolar están tan influidas por el uso del lenguaje de la vida diaria, que es muy elevado el número

de alumnos de la enseñanza secundaria que atribuyen la multiplicidad de significados propia del lenguaje cotidiano al sustantivo calor y a los verbos calentar/enfriar, así como a expresiones derivadas de ellos (Domínguez Castiñeiras, 2000). De hecho, una de las concepciones alternativas más extendidas es la identificación de los conceptos calor y temperatura (Tiberghien, 1980), inducida por algunas de las acepciones del verbo polisémico calentar: calentar un sistema es dar calor a un sistema, y calentarse un sistema es incrementarse la temperatura del sistema. El adjetivo caliente también hace equivaler el calor al nivel de energía térmica: el sistema tiene una alta temperatura (porque tiene mucha energía térmica) es sinónimo de que el sistema contiene una determinada cantidad de calor.

En ocasiones, los alumnos consideran que el calor es una magnitud intensiva cuya medida viene dada por la temperatura (Kesidou y Duit, 1993). Al comparar entre sí cuerpos más o menos calientes, llegan a establecer una escala cuantitativa que mide la cantidad de una magnitud próxima a la temperatura (Albert, 1978).

En general, la comprensión del concepto de temperatura es bastante limitado entre los alumnos de 12-14 años (Erickson, 1989), a pesar de que a estas edades ya conocen el término temperatura y la mayoría utiliza el termómetro para medir la temperatura de los objetos; sin embargo, tienden a dar crédito a sus percepciones sensoriales, y sostienen que la temperatura es una propiedad que depende de las sustancias de las que se compone el sistema (Valcárcel, Pro, Banet y Sánchez, 1990; Domínguez Castiñeiras, 2000). También se han detectado dificultades para aceptar el carácter intensivo de la temperatura (Valcárcel, Pro, Banet y Sánchez, 1990; Domínguez Castiñeiras, 2000), sobre todo en estudiantes menores de 15 años; en los mayores se observa una confusión entre la temperatura y la energía de activación (Gussarsky y Gorodetsky, 1988). Una instrucción que permita a los estudiantes observar en la práctica el comportamiento térmico de los sistemas materiales puede ayudar a superar estas dificultades (Stavy y Berkowitz, 1980; Domínguez Castiñeiras, 2000).

En cuanto a la adquisición del concepto de calor (Erickson, 1979, 1980, 1989), destacaremos que se produce hacia los 8-9 años, cuando los niños empiezan a ser conscientes de los procesos de calentamiento y enfriamiento de los cuerpos. Entonces establecen una relación causal entre la fuente responsable del proceso y el objeto afectado por la acción de la fuente. El calor se suele visualizar como una entidad con la capacidad de "calentar" los cuerpos a medida que se almacena en ellos. Algunos enunciados bastante utilizados en las aulas refuerzan estas ideas espontáneas, o bien por tener su origen en intuiciones relacionadas con la observación, o por enmarcarse en antiguas teorías sobre el calor, lo que perpetúa varios obstáculos epistemológicos ya superados por la comunidad científica. Por ejemplo, la expresión escolar "el calor ganado es igual al calor perdido" sugiere que el calor es una entidad material (quizá un fluido) que se puede almacenar o transferir de un cuerpo a otro o de una parte del sistema a otra. Algunos autores,

como Heath (1976), proponen eliminar el sustantivo calor de la enseñanza, para evitar la identificación del calor con la temperatura o la concepción de ésta como el grado de "calentamiento" de un cuerpo. Otros autores consideran que, por el contrario, el vocablo calor debe mantenerse en las aulas y hacerse explícita su relación con la energía interna de los sistemas (Hierrezuelo y Montero, 1987).

De hecho, la principal fuente de origen de las ideas alternativas sobre el calor es la concepción de éste como una entidad material y no un proceso (ésta es la categoría ontológica científicamente aceptada). La asignación ontológica inadecuada, y la familiaridad y utilidad de las ideas espontáneas y cotidianas (Solomon, 1983) explican que estas ideas alternativas sean tan difíciles de cambiar (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994). Los alumnos deben superar esta barrera conceptual para iniciarse en la noción científica de calor (Erickson y Tiberghien, 1989).

A medida que las ideas de los estudiantes avanzan hacia las de la ciencia escolar, evoluciona el modelo de calor que utilizan para interpretar los fenómenos térmicos (Erickson, 1979, 1980). Desde el modelo infantil en el que calor y temperatura son sinónimos o prácticamente sinónimos, se pasa a relacionar el calor con la forma y la composición del sistema; más adelante se construye el modelo cinético, en el que el calor se define como el grado de agitación molecular de un sistema, y se transfiere entre cuerpos. Una instrucción que enfatice en los aspectos microscópicos de la materia ayuda significativamente a desarrollar un modelo cinético molecular con el que explicar los fenómenos térmicos (Cárdenas y Ragout de Lozano, 1996; Martínez y Pérez, 1997; Domínguez, De Pro y García, 1998b).

Para Erickson (1979, 1980), los alumnos no suelen abandonar su modelo inicial para adoptar otro más avanzado, aunque sí tienden a asumir el modelo cinético a medida que crecen en edad y en experiencia de los fenómenos naturales; pero la mayoría no llega a desarrollar el modelo cinético porque considera que para interpretar los fenómenos térmicos es más útil el calórico (Hewson, 1984), modelo intermedio entre el infantil y el cinético que demuestra una gran persistencia también entre los alumnos de los niveles superiores de la enseñanza (Beall, 1994; Viennot, 1998; Niaz, 2006), incluso en algunos universitarios.

Según el modelo calórico, el calor es una sustancia fluida que se almacena en los cuerpos y puede absorberse o cederse a otro cuerpo o al medio. La transferencia se produce por una fuerza motriz inherente al calor (Erickson, 1989), y su flujo se puede detectar midiendo la diferencia de temperatura que experimentan los cuerpos implicados en el proceso de calentamiento (Beall, 1994). La evolución de las ideas de los alumnos entre los modelos infantil, calórico y cinético es un buen ejemplo de paralelismo entre la evolución del conocimiento científico y la evolución de las ideas del alumnado (Saltiel y Viennot, 1985), tendencia que se observa claramente en el ámbito de la Termodinámica (Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini, 2002).

En una de las variantes del modelo calórico, el calor se entiende como una entidad material que carece de masa (Erickson, 1980, 1989) y puede estar alojada o almacenada en el sistema y ganarse o perderse durante un proceso. El mecanismo de transferencia necesita o de un contacto directo entre los cuerpos involucrados en el calentamiento, o de un medio interpuesto que sea transmisor del calor. El diferente calentamiento de objetos distintos que se encuentran en contacto con la misma fuente de calor se explica atribuyendo a éste (o al cuerpo que lo absorbe) una fuerza o intensidad de acción sobre la materia: si el calor es fuerte, penetra en el objeto, y si es débil no es capaz de hacerlo (Domínguez Castiñeiras, 2000). En otros casos, sobre todo en las reacciones químicas, es frecuente que consideren el calor como una sustancia que toma parte en la reacción o que se forma en ella (Watson, Prieto, y Dillon, 1997; Carson y Watson, 2002). Estas concepciones materiales de las transferencias energéticas que tienen lugar durante los procesos químicos pueden verse reforzadas por la inadecuada formulación que utilizan algunos libros de texto para las ecuaciones químicas: al escribir el calor (o la energía) como un sumando más en una ecuación química, se sugiere que el calor/energía es un reactivo o producto de la reacción (Niaz, 2006). Pero, en general, los estudiantes no necesitan manifestar sus ideas sobre el calor o la energía para resolver los ejercicios que figuran en los libros de texto de Química (Gabel y Bunce, 1994).

Otras ideas alternativas que se han detectado incluso en los niveles superiores de la enseñanza son la concepción del calor como una fuente de energía (Bordogna, Cappannini, Cotignola y Punte, 2002) o como una energía susceptible de ser captada o absorbida por los cuerpos (Thomas y Schwenz, 1998).

Si la influencia del lenguaje cotidiano tiene mucho que ver en las ideas que desarrollan los estudiantes sobre el calor, la energía tampoco es excepción; basta recordar la enorme polisemia cotidiana de la palabra "energía" y contrastarla con el significado restringido y muy abstracto que tiene en el lenguaje científico.

El concepto de energía es uno de los más importantes en Física y en Química, donde se utiliza en campos que van desde la Termodinámica a la Mecánica Clásica o la Mecánica Relativista, y se estudia también en Biología y Geología para interpretar el metabolismo de los seres vivos y la influencia de los estilos de vida en la salud, las relaciones en las redes tróficas de los ecosistemas, las transformaciones en las distintas partes de la geosfera… También es uno de los conceptos que ha suscitado mayores controversias en las comunidades científica y educativa. Al revisar las aportaciones bibliográficas que tratan las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje de los alumnos, las propuestas didácticas para la enseñanza de la energía y la problemática epistemológica surgida alrededor la energía y de su inclusión o exclusión de los programas educativos, se observa que el tema ha generado ya miles de publicaciones, y que el ámbito que más investigaciones acapara hasta la fecha es, de lejos, la Física, seguida por la Química y a mucha distancia de la Biología (Pfundt y Duit, 2000; Duit, 2004).

Como no es objetivo de la Tesis analizar pormenorizadamente este tema, no lo revisaremos exhaustivamente, aunque sí citaremos algunas de las principales publicaciones de las últimas tres décadas en el ámbito de la Química. En este apartado se recogen las más generales, y en el apartado sobre las ideas alternativas de los alumnos en Termoquímica y Termodinámica Química (*Los procesos químicos*, pág. 141) se incluyen las publicaciones más relacionadas con los contextos de las reacciones químicas.

Para empezar, todos los investigadores coinciden en que la energía es uno de los constructos teóricos más difíciles de aprender (Warren, 1982; Watts, 1983; Duit, 1984; Solomon, 1984; Driver y Warrington, 1985; Duit, 1986…) Pero, como a la vez es uno de los más globales e integradores, en los años ochenta elaboraron varias propuestas didácticas innovadoras que parten de este concepto para llegar a conectar entre sí varias disciplinas científicas distintas (*Propuestas didácticas y materiales de aprendizaje publicados en el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos*, pág. 232). Al mismo tiempo, otros autores apelaban a las dificultades que entraña la comprensión de la energía (si es difícil incluso para los expertos, ¿cuánto se puede esperar que aprendan los estudiantes?), y abogaban por demorar varios cursos la introducción de la energía o eliminarla de los *curricula* de la enseñanza secundaria (Sánchez Mambrilla, 1983a). En el apartado *Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica* (pág. 202) se analiza detenidamente esta controversia.

Más allá de este debate de base epistemológica, las relaciones entre la energía y sus procesos de transferencia (calor y trabajo) han levantado otra controversia en la comunidad didáctica, debido a la multitud de ideas alternativas con las que los alumnos llegan a las clases de Ciencias y a la confusión que suele presentarse al respecto en los libros de texto (Vázquez Díaz, 1987; Michinel y D'Alessandro, 1994; Leite, 1999). Varias de las ideas alternativas que se derivan de las acepciones cotidianas de energía, trabajo y fuerza son extraordinariamente estables y, entre ellas, destacan que el trabajo realizado por un sistema es mayor cuanto mayor es la fuerza ejercida, y que la realización de trabajo implica una disminución en la energía del sistema (Ogborn, 1986; Pintó Casulleras, 1991). Las dificultades para diferenciar energía y trabajo persisten durante años (Driver y Warrington, 1985), y los alumnos prefieren interpretar los fenómenos termodinámicos desde un punto de vista cinemático o dinámico simple, utilizando la velocidad y la fuerza.

Dada la cantidad y variedad de las ideas alternativas que se identificaron en la literatura, algunos investigadores optaron por clasificarlas en lo que podemos denominar estructuras (*frameworks*) o visiones (*visions*) alternativas de la energía (Watts, 1983; Solomon, 1984; Brook, 1986; Gayford C. G., 1986; Finegold y Trumper, 1989; Trumper, 1990a; Pintó Casulleras, 1991; Trumper y Gorsky, 1993; Duit y Häussler, 1994; Doménech Blanco, 2000; Tarín, 2000).

La primera de las clasificaciones con mayor impacto en la literatura es la de (Watts, 1983). Según su estudio, las concepciones de los alumnos se encuadran en siete categorías o estructuras (*frameworks*) alternativas diferentes: la energía desde un punto de vista antropocéntrico (*human-centered*); el modelo de los depósitos o reservorios (*depositories*) de energía; la energía como ingrediente; la energía como actividad manifiesta, en un concepto similar al de la antigua teoría vitalista; la energía como un producto; la energía como entidad funcional, ya sea combustible, electricidad o cualquier entidad activa que ejerce un papel motriz en máquinas; y, por último, el modelo del flujo de energía. Algunas de estas categorías están claramente relacionadas entre sí y en algunos contextos o situaciones pueden solapar sus significados, llegar a ser equivalentes o formar parte de una estructura alternativa de mayor inclusividad. Por ejemplo, en el contexto de los procesos químicos, pueden reclasificarse las estructuras de "la energía como ingrediente" y "la energía como producto" en una única estructura alternativa en la que la energía se concibe como una sustancia material. Si la reacción química se acompaña de un aumento en la temperatura del entorno, los alumnos pueden agregar a esta estructura alternativa el modelo del flujo de energía: la temperatura del entorno aumenta porque la sustancia "energía", formada en la reacción, fluye a él. O, por ejemplo, el modelo antropocéntrico y el de depósito de energía pueden ser equivalentes en situaciones como la de una persona que empuja un objeto o tira de él: el ser humano "tiene energía", y por ello puede concebirse como un reservorio; a la vez, la transferencia de la energía desde la persona hasta el objeto puede conceptualizarse como una transferencia de flujo desde el reservorio humano al reservorio objeto, que necesita de la energía para moverse (actividad).

Para Solomon, (1984), las estructuras alternativas de Watts no responden a los significados que los estudiantes dan a la energía, sino más bien a los métodos de recogida e interpretación de la información que Watts utilizó en su investigación, basados en entrevistas sobre situaciones concretas relacionadas con la energía (*interview about instances*). Según Solomon, (1984), Watts no tuvo en cuenta que los alumnos tienden a aplicar diferentes acepciones a los términos científicos según las situaciones y contextos que se les presenten. Pueden enfocar la energía desde un punto de vista vitalista, si la asocian con la idea de que los seres vivos (en particular el ser humano) necesitan energía para vivir; pueden asociarla a la actividad y al movimiento, o a la combustión, si el contexto incluye el funcionamiento de alguna máquina; y, si la cuestión les evoca la necesidad de conservar los recursos energéticos, pueden adoptar la perspectiva conservacionista de la energía (Solomon, 1983a, 1984), que en otros contextos no llegan a utilizar, posiblemente porque prefieren ceñirse a las ideas cotidianas (Driver y Warrington, 1985).

Otros autores añadieron aportaciones a las categorías de Watts (1983):

Para Trumper (1990, 1993, 1998), en la estructura alternativa de los depósitos de energía pueden distinguirse dos roles diferentes de los reservorios energéticos:

por un lado, el rol pasivo que describe Watts (1983), y, además de éste, un rol activo según el cual la energía es o bien el agente causante de que los procesos tengan lugar, o cuando menos un requisito imprescindible para ello ("la bombilla necesita energía para dar luz"). Trumper (1990) también incluyó una matización a la estructura alternativa de la energía como producto: la energía puede visualizarse como auténtico producto principal de un proceso o como subproducto. Además, clasificó el concepto deseable de energía en una estructura conceptual que denomina "de transformación", porque concibe la energía como algo que se transfiere entre sistemas en cualquier proceso natural.

Otros autores (Brook, 1986; Pintó Casulleras, 1991; Nicholls y Ogborn, 1993) reorganizaron las siete categorías de (Watts, 1983) en cinco estructuras alternativas: la energía como actividad humana, la energía como combustible, la energía relacionada con la actividad visible o el movimiento, la energía como fuerza, y la energía como fluido invisible. Ésta última es una concepción próxima a la antigua teoría del calórico.

Hasta ahora hemos resumido las principales aportaciones en el ámbito de la Física, pero estas ideas alternativas se presentan también en Química y Biología. En Biología, (Gayford, 1986) clasificó las ideas de los alumnos en cuatro estructuras alternativas mayoritarias a las que denominó modelos (*models*) alternativos, que coinciden con varias de las estructuras de Watts (1983): el modelo de depósitos de energía, el modelo de la energía como producto o subproducto de un proceso, el modelo de flujo de energía, y el modelo de energía como ingrediente. Observó que los estudiantes tendían a utilizar unas u otras concepciones dependiendo de la situación y contexto que se les planteara. Esta tendencia también se observa en Física y Química, incluso entre los universitarios (Liu, Ebenezer y Fraser, 2002).

En comparación con las ideas del alumnado de secundaria, las ideas de los universitarios están poco exploradas, aunque sí se han publicado reflexiones de largo alcance sobre la incidencia de las formas de razonamiento espontáneo (Salinas, Cudmani y Pesa, 1996) y sobre las relaciones entre la enseñanza universitaria y la Didáctica de las Ciencias (Guisasola, Gras-Martí, Martínez Torregrosa, Alumdí y Becerra, 2004); nuevamente, estas publicaciones están centradas en la enseñanza de la Física. Existen algunos estudios acerca de las ideas alternativas de los universitarios (y los maestros de primaria) sobre el concepto de energía (Kruger, Palacio y Summers, 1992), y recientemente se han detectado limitaciones en la comprensión que tienen los estudiantes universitarios sobre los sistemas materiales (Covaleda, Moreira y Caballero, 2005), el calor y la temperatura en fenómenos sencillos, como los cambios de estado (Odetti, Falicoff, Contini y Humpola, 2001).

En su Tesis Doctoral, Pintó Casulleras (1991) comparó las concepciones de la energía que mantenían alumnos de 11 a 13 años con las ideas de los que cursaban el primer curso de la licenciatura en Ciencias y el tercero de la licenciatura en Física.

Como era de esperar, encontró una gran diferencia en las definiciones de energía que aportaban los alumnos de enseñanza primaria frente a los universitarios. Éstos habían abandonado casi por completo la concepción de energía como fuerza o como "algo útil en la realización de procesos": solamente un 2,5% del alumnado de Física lo afirmaba. Sin embargo, muchos consideraban que la energía fluye de unos cuerpos a otros, y esta idea se presentaba incluso entre los que hablaban de "transferencia de energía" para referirse a la interacción energética entre sistemas. Según Pintó Casulleras (1991), esta dificultad mantiene una relación directa con las analogías y modelos cotidianos, porque cuando describimos la energía como una propiedad de los sistemas y analizamos los cambios que experimenta, nos resulta más sencillo visualizar la energía como una entidad material que se aloja físicamente en algún lugar y viaja de un punto a otro.

Por su parte, Duit y Häussler (1994) manifiestan que las clasificaciones de las ideas alternativas en estructuras o modelos alejados de la ciencia escolar no contribuyen sustancialmente a que los investigadores diseñen y desarrollen nuevas propuestas de enseñanza encaminadas a ayudar a los estudiantes a construir las ideas de la ciencia escolar. Para Duit y Häussler (1994), los investigadores encontrarían más útil un análisis de las estructuras alternativas sobre la base de los cinco aspectos centrales del concepto científico de energía: la definición, las transformaciones, el transporte, la conservación y la degradación de la energía. En el ámbito de la Biología, los estudios relacionados con los aspectos medioambientales hacen hincapié en las ideas del alumnado sobre la adquisición, generación, almacenamiento, transporte, consumo y conservación de la energía (Bodzin, 2012).

Similares categorías, pero con propósito diferente, utilizaron en esta última década Liu y McKeough (2005) para analizar las respuestas de alumnos estadounidenses a algunos *items* de las pruebas TIMMS. Para estos autores, los aspectos más relevantes de la energía son la actividad o el trabajo realizado, las fuentes y formas de energía, la transferencia energética, la conservación de la energía y degradación de la energía. Con esta categorización de las estructuras conceptuales, llegaron a la conclusión de que la comprensión de la energía depende en gran medida de la madurez cognitiva; sin embargo, en su estudio se limitaron a analizar los resultados de las pruebas TIMMS en términos de respuestas "correctas" e "incorrectas", sin tener en cuenta ni las ideas con las que los alumnos habían llegado a la clase de Ciencias ni el impacto que tuvo en ellas la instrucción que recibieron durante el curso en el que se implementaron las pruebas.

Si el aprendizaje estuviera determinado fundamentalmente por los factores biológicos (como la madurez cognitiva) hasta el punto que afirman Liu y McKeough (2005), las propuestas de enseñanza no tendrían capacidad para propiciar cambios significativos en las ideas de los estudiantes. Sin embargo, investigaciones como las de Solomon, (1983b) o Smith, Maclin, Houghton y Hennessey (2000), en las que se discute la influencia de la instrucción sobre las ideas del alumnado en el tema de la

energía, concluyen que los estudiantes no universitarios pueden realizar un aprendizaje estable y acorde con la ciencia escolar cuando se aplican propuestas de enseñanza diseñadas para construir conocimientos. Estos avances en el aprendizaje no son nuevos; ya en los años 80, Driver y Warrington (1985) consideraban que las ideas de los alumnos pueden evolucionar hacia las científicamente aceptadas si se parte de una concepción inicial basada en las experiencias y sensaciones de los que aprenden y se amplía esta concepción más allá de la perspectiva antropocéntrica y vitalista, introduciendo las nociones de conservación y degradación de la energía.

El hecho de que los estudiantes reciban instrucción científica no quiere decir que las primeras estructuras alternativas se eliminen, aunque sí se producen en ellas modificaciones hacia las ideas de la ciencia escolar. Sin embargo, los nuevos constructos pueden integrarse en las viejas estructuras alternativas, como se observa en el ámbito de la Relatividad (Pintó Casulleras, 1991; Prado Orbán, 2010). Por ejemplo, la expresión $E = m \cdot c^2$ puede conceptualizarse como una materialización de la energía a través de la masa, que suele confundirse con el concepto de materia: la materia puede desaparecer y convertirse en energía, y viceversa. Según Solomon (1983b), las concepciones más persistentes sobre la energía en los niños son la antropomórfica y la relacionada con la actividad, aunque con la edad tienden a desarrollar las ideas de conservación y degradación de la energía.

En el campo de la Termodinámica, las ideas del alumnado sobre la energía y sus transferencias son extraordinariamente resistentes a su desplazamiento por las concepciones de la ciencia escolar (ver, por ejemplo: Carson y Watson, 1999, 2002). Según la mayoría de los autores que han explorado esta cuestión, los dos principales obstáculos a la evolución del conocimiento son los siguientes:

En primer lugar, los estudiantes tienden a abordar el tratamiento de los cambios energéticos utilizando los conceptos de calor y trabajo como entidades *quasi*-materiales, en lugar de entenderlos como procesos (Watson, Prieto y Dillon, 1997; Carson y Watson, 1999). Esta tendencia, que parece estrechamente relacionada con la concepción de la energía como una entidad *quasi*-material (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994), se ha observado repretidas veces en alumnos universitarios, como recoge Pintó Casulleras (1991); esto demuestra que les resulta funcional para la interpretación (alternativa) de los fenómenos termodinámicos.

La estructura alternativa de las *formas de energía* es el segundo gran obstáculo que se presenta a la hora de construir un concepto científico de energía. Para muchos estudiantes, el ente *pseudo*-sustancial energía puede adoptar diversas formas que son convertibles unas en otras y tienen la capacidad de transferirse entre sistemas si adoptan la forma adecuada a cada caso. Debido a la flexibilidad conceptual de esta idea, los alumnos llegan a construir inferencias alternativas bastante plausibles sobre los intercambios energéticos que tienen lugar en los procesos físicos y químicos. Por ejemplo, a la hora de interpretar el papel del ATP en

los procesos metabólicos que implican reacciones de fosforilación y desfosforilación (Galley, 2004), puede considerarse que la energía es un producto más de la reacción:

$$ATP \rightarrow ADP + P + \textit{Energía}$$

En el marco de la estructura alternativa de las formas de energía, el calor (Pintó Casulleras, 1991; Liu, Ebenezer y Fraser, 2002) y el trabajo (Watson, Prieto y Dillon, 1997) se conciben como algunas de las formas que la energía puede adoptar en los procesos naturales; otras son las energías química, térmica, mecánica y eléctrica. En algunas condiciones, la energía adoptará una forma que le permita transferirse entre sistemas y, en otras condiciones, evolucionará hacia la que sea más adecuada para almacenarse en un sistema. Utilizando esta estructura alternativa, los alumnos explican sus observaciones sobre las transferencias energéticas y llegan a justificar la ausencia de transferencias y la capacidad de cambio que consideran propia de los sistemas de almacenamiento de energía, como las baterías de las máquinas (Liu, Ebenezer y Fraser, 2002).

En el contexto de las reacciones químicas (Martins y Cahachpuz, 1990), consideran que la energía se presenta en forma de energía química (Gallástegui Otero y Lorenzo Barral, 1993) o de calor (Liu, Ebenezer y Fraser, 2002). De esta manera se justifica la existencia de energía en los reactivos (que son reservorios o contenedores de la energía química) y se interpreta el hecho de que algunas reacciones "produzcan" o "den" calor/energía. Fuera del ámbito académico, esta estructura alternativa aparece en los textos de los medios de comunicación: las combustiones y algunas reacciones metabólicas se producen porque los combustibles y los alimentos contienen una cantidad de energía química susceptible de liberarse al medio si las condiciones son favorables. En los razonamientos más minuciosos, se añade que para que se produzca la liberación de la energía contenida en los reactivos (o reservorios), se necesita una interacción entre el material combustible y el oxígeno.

Esta concepción puede verse reforzada en el contexto escolar a través de expresiones como la siguiente, que se utiliza profusamente en los libros de texto de Biología o Bioquímica (Gayford, 1986; Galley, 2004): decir que determinados enlaces son muy energéticos (por ejemplo, los de adenosina trifosfato) da a entender que contienen una energía que se puede liberar cuando los enlaces se rompen. No hemos de olvidar que los alumnos se sienten más cómodos trabajando en el dominio macroscópico, y que la enseñanza tradicional tiende a obviar las interpretaciones microscópicas (Liu, Ebenezer y Fraser, 2002). Si tenemos en cuenta las ideas alternativas sobre la naturaleza de la materia (*La materia y su estructura. Las sustancias químicas*, pág. 136) y de los enlaces químicos (*Las interacciones químicas*, pág. 139), no es de extrañar que en el ámbito de la Termoquímica y la Termodinámica Química se desarrolle una gran variedad de ideas relacionadas con las *formas de energía*. La energía, ente *quasi*-material capaz de metamorfosearse en

entidades como calor, luz, electricidad, etc. (Goldring y Osborne, 1994), puede residir dentro de los enlaces químicos, donde se almacena hasta que algún agente activo la fuerce a liberarse por la ruptura del enlace (Hapkiewicz, 1991; Liu, Ebenezer y Fraser, 2002; Galley, 2004). El agente activo es con frecuencia la propia energía, que actúa a través de una chispa o de calor.

En realidad, algunas de las estructuras alternativas identificadas por (Watts, 1983; Solomon, 1984; Gayford, 1986; Trumper y Gorsky, 1993; Duit y Häussler, 1994) son aspectos o manifestaciones particulares de esta estructura alternativa de las *formas de energía*, e ilustran la flexibilidad y funcionalidad con la que ésta responde a cuestiones tan variadas como la nutrición, el funcionamiento de los sistemas eléctricos, los balances energéticos de los procesos químicos o las manifestaciones energéticas lumínicas.

Con la estructura de las formas de energía, sobre todo si se llega a desarrollar en su versión microscópica, los alumnos disponen de una potente herramienta alternativa para interpretar los procesos termodinámicos obviando la naturaleza abstracta del concepto de energía (Bunge, 1999, 2000). La naturaleza ontológica y epistemológica de la energía es muy compleja (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994; Vosniadou, 1994; Vosniadou y Ioannides, 1998).

Los conceptos termodinámicos que se van presentando a lo largo de la ESO y el Bachillerato son susceptibles de incorporarse a la estructura alternativa de las formas de energía, porque tanto la energía interna como la entalpía, y también nociones más abstractas como la entropía y la energía de Gibbs, pueden visualizarse como nuevas *formas de energía*. De hecho, muchos investigadores que han explorado las ideas del alumnado en este ámbito han detectado que la estructura alternativa de las *formas de energía* es un auténtico andamiaje de las concepciones espontáneas en la enseñanza secundaria y universitaria.

El lenguaje de los profesores y los libros texto contiene a veces expresiones que pueden reforzar esta estructura: si se indica que la energía "se manifiesta como calor", parece indicar que el calor, en tanto que manifestación de la energía, es una entidad *quasi*-material, que de alguna manera es energía o bien una transmutación de la energía que la hace figurar bajo una apariencia perceptible.

En Ciencias, por economía de lenguaje, se suele hablar de "transferencia de calor" en lugar de transferencia de energía por calor. El lenguaje científico incluye varios giros o expresiones de este tipo, como es el caso de la famosa expresión "sistema periódico"; está claro (al menos para un científico) que la entidad periódica no es el sistema de ordenación de los elementos químicos, sino cualquier propiedad de los mismos que verifica una periodicidad tal que permite ordenar los elementos en el sistema "periódico". No es infrecuente que los textos científicos recojan estas expresiones, como la publicación de (Pétursson, 2003), en la que se denomina "formas de energía" a las manifestaciones perceptibles de la misma: calor,

expansión, cambios en la energía mecánica… Los científicos entienden sin problemas estas expresiones y las utilizan en su jerga de expertos, pero el alumnado no tiene por qué entenderlas en el sentido en que se pretende que lo hagan. Por ello, desde la comunidad investigadora se insiste en que los libros de texto deben utilizar una expresión científicamente clara y sin ambigüedades, y que los profesores deben ser cuidadosos con las expresiones que emplean en el aula y ayudar a los alumnos a hacer explícitas sus ideas y negociar los significados de los términos lingüísticos que utilizan. En este sentido, deben evitarse expresiones como "energía transferida en forma de calor" (Erickson y Tiberghien, 1989). Aun en los niveles avanzados de la enseñanza secundaria, es recomendable no dar por supuesto que los alumnos comparten los significados científicos de nociones básicas como la temperatura, el calor o la energía (Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993).

Desde la comunidad investigadora en Didáctica de las Ciencias también se advierte que los libros de texto actuales no solamente contienen expresiones ambiguas o poco adecuadas desde el punto de vista científico, sino también algunos errores conceptuales manifiestos (ver, por ejemplo: Bauman, 1992a,b). En el tema de Termodinámica, precisamente, se observa una notable resistencia a revisar los antiguos significados de los conceptos de acuerdo con la evolución de las teorías científicas (Strube, 1988; Stylianidou y Ogborn, 1999; Cotignola *et al.*, 2002), se aprecia poco rigor en la declaración y la manipulación de las magnitudes termodinámicas, incluso en los textos universitarios (Quílez, 2009), y se presentan perspectivas didácticas poco actualizadas (Furió-Gómez, Solbes y Furió, 2006).

Otras disciplinas de la Dinámica: Cinética Química y Equilibrio Químico

Para construir una visión dinámica completa de un proceso químico, se debe analizar por qué sucede el proceso y en qué condiciones (Termodinámica Química), a qué velocidad sucede (Cinética Química) y en qué estado queda el sistema una vez que el proceso ha terminado (Equilibrio Químico). Las tres disciplinas que conforman la Dinámica de los procesos químicos están interconectadas conceptualmente entre sí. De hecho, las bases teóricas del Equilibrio Químico son puramente termodinámicas. Sin embargo, la mayor parte de los libros de texto abogan por construir una aproximación cinética al tema de Equilibrio Químico (Rocha, 2008), aun cuando ésta es aplicable a un número muy reducido de procesos químicos (Hackling y Garnett, 1985; Banerjee, 1995). Una variante más fructífera de esta aproximación consiste en enfocar el equilibrio de manera cualitativa mediante un tratamiento cinético, y luego aplicar el modelo cinético molecular para interpretar los cambios que suceden en el sistema y llegar a la noción de equilibrio como un estado dinámico; en esta aproximación están implícitas las bases teóricas de la Termodinámica Química.

Como no es objetivo de esta Memoria revisar las ideas alternativas en Cinética Química y Equilibrio Químico, de lo cual ya se han ocupado otras Tesis de

nuestra línea de investigación (Sánchez Piso, 2006; Rocha, 2008), nos limitaremos a enumerar las más destacadas en la literatura y a describir brevemente sus orígenes y persistencia, que tienen bastantes puntos en común con las ideas alternativas en Termodinámica Química. De hecho, las dificultades de aprendizaje que se detectan en las tres disciplinas se relacionan con la elevada demanda cognitiva y la complejidad de los razonamientos que se deben elaborar, y con la influencia de la acción escolar en metodologías que ignoran las ideas previas de los alumnos y en ocasiones las refuerzan (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a; Johnstone, MacDonald y Webb, 1977b). También en Cinética Química y Equilibrio Químico, las observaciones experienciales y la influencia del lenguaje cotidiano y las formas de razonamiento propias del pensamiento espontáneo pueden generar o reforzar ideas y formas de razonamiento alejadas de la ciencia escolar (Pozo y Gómez Crespo, 1998; Furió y Furió-Más, 2000): modelos inadecuados de las reacciones químicas, dificultades de comprensión relacionadas con la simbología que se utiliza en las ecuaciones químicas, confusiones entre varios conceptos científicos relacionados… (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977b; Nakhleh, 1992)

En cuanto a la investigación sobre las dificultades de aprendizaje en Cinética Química y en Equilibrio Químico, indicaremos que las primeras han recibido mucha menos atención que las segundas (Sánchez Piso *et al.*, 2002; Sánchez Piso, 2006), aunque en la literatura el número de propuestas didácticas para Cinética Química es bastante elevado y se recogen muchas actividades teóricas (más mentales) y de laboratorio, así como materiales informáticos enfocados a la enseñanza de este tema (Sánchez Piso, Domínguez Castiñeiras y García-Rodeja Fernández, 2002). En cambio, existen muy pocas propuestas didácticas sobre Equilibrio Químico (Rocha, 2008), aunque sí se han publicado recomendaciones para acercar las ideas del alumnado a las de la ciencia escolar (Raviolo y Martínez, 2003).

Dado que el Equilibrio Químico solamente se estudia en los niveles avanzados de la enseñanza secundaria, se espera que el alumnado llegue al aula con una idea de "equilibrio" que responda a las acepciones cotidianas del término y al aprendizaje de la Mecánica Clásica. Según Covaleda, Moreira y Caballero (2005), el significado que los estudiantes dan inicialmente al equilibrio está basado en aprendizajes anteriores realizados en varios contextos, que le pueden dar un sentido próximo o equivalente a *reposo*, *movimiento a velocidad constante* o *conservación del estado del sistema.* También el concepto de velocidad de reacción se ve influenciado por la polisemia que tiene la palabra velocidad en nuestra vida diaria (Sánchez Piso, 2006). En algunos casos, se considera que la velocidad aumenta a medida que transcurre el tiempo (Hackling y Garnett, 1985), en lo que parece una confusión de los conceptos velocidad y aceleración. Se han documentado asimismo confusiones entre la energía de activación y la temperatura (Gussarsky y Gorodetsky, 1988).

Los autores que han explorado las dificultades de aprendizaje del Equilibrio Químico (por ejemplo, Hackling y Garnett, 1985; Bergquist y Heikkinen, 1990, o más

recientemente la revisión de Raviolo y Martínez, 2003), destacan que las concepciones del alumnado sobre las reacciones químicas condicionan la aparición y permanencia de ideas alternativas sobre el equilibrio de los sistemas. También son un obstáculo las dificultades asociadas a la comprensión de algunas nociones termodinámicas (como la reversibilidad de los procesos) y a la conceptualización del carácter extensivo de algunas magnitudes y el carácter intensivo de otras, como sucede con la concentración, que algunos confunden con la masa del sistema (Wheeler y Kass, 1978; Gorodetsky y Gussarsky, 1986). Al considerar que la concentración indica la cantidad de materia, algunos alumnos aplican el tratamiento estequiométrico a las concentraciones, guiándose por los coeficientes de la ecuación química (Hackling y Garnett, 1985). Como sucede con la Termodinámica, en el aprendizaje del Equilibrio Químico también se presentan obstáculos relacionados con reglas de fijación funcional, debido a la excesiva importancia que se otorga en el contexto escolar a los cálculos estequiométricos (Hackling y Garnett, 1985).

Otra confusión muy generalizada es la identificación de la velocidad de un proceso químico con la extensión del mismo (Wheeler y Kass, 1978), aun para quienes manejan un modelo en el que se relaciona adecuadamente la velocidad de reacción con la temperatura del sistema (Camacho y Good, 1989). Esta idea parece tener que ver con una interpretación inadecuada de la simbología de las ecuaciones químicas (Hackling y Garnett, 1985; Camacho y Good, 1989) y, en concreto, de la doble flecha que relaciona los reactivos con los productos (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977b). Las interpretaciones alternativas del significado de la doble flecha se manifiestan también en la "visión pendular del equilibrio" (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977b; Bergquist y Heikkinen, 1990), por la que se considera que si un sistema está en equilibrio, se encuentra dividido en dos compartimentos separados entre los cuales se desplazan en un sentido los reactivos y en el otro los productos. Esta visión pendular parece derivar de la acepción cotidiana del equilibrio como un estado de inmovilidad de dos cuerpos sometidos a fuerzas que se compensan o contrarrestan mutuamente (situación de una balanza "equilibrada"). Las visiones alternativas del equilibrio pueden verse reforzadas desde el contexto escolar por las analogías que utilizan los profesores y los libros de texto (Rocha, 2008).

Se han publicado bastantes estudios sobre los problemas de aprendizaje relacionados con la utilización del principio de Le Châtelier (Rocha, 2008). Las dificultades que describe la literatura (Gorodetsky y Gussarsky, 1986; Hackling y Garnett, 1985) consisten en la aplicación mecánica del enunciado (fijación funcional) y en la interpretación meramente macroscópica de los cambios del sistema, además de involucrar las ideas alternativas ya comentadas. Por ejemplo, entre los estudiantes que confunden la velocidad y la extensión de la reacción, algunos utilizan el principio de Le Châtelier para predecir cómo varían las velocidades directa e inversa del proceso, o consideran que la velocidad de una reacción se debe alterar para ajustarse al principio (Hackling y Garnett, 1985).

Hasta este punto, el estado de la cuestión se ha centrado en dejar constancia del origen de las dificultades de aprendizaje sobre la Termodinámica de los procesos químicos. Se han analizado aquellas características inherentes a la disciplina que obstaculizan su comprensión, se han puesto de manifiesto cuáles son los prerrequisitos conceptuales para una construcción adecuada de los conocimientos termodinámicos, y se han resumido aquellas dificultades en Cinética Química y Equilibrio Químico que tienen relación con los aspectos termodinámicos.

A continuación, se exponen las ideas alternativas que la investigación didáctica ha puesto de manifiesto en Termodinámica de los procesos químicos.

Ideas alternativas y dificultades de aprendizaje en Termoquímica y Termodinámica Química

En este apartado se exponen los conocimientos del alumnado en Termoquímica y Termodinámica Química, que hemos encontrado a lo largo de la revisión bibliográfica sobre el tema. Siguiendo los enfoques de investigación en concepciones alternativas a los que se refieren Pintó, Aliberas y Gómez (1996), se resumen las ideas alternativas, las formas de razonamiento y los modelos mentales que se han detectado en los estudiantes de la enseñanza secundaria y universitaria.

Las ideas alternativas del alumnado en Termoquímica y Termodinámica Química no se diferencian significativamente de las de otros ámbitos de las Ciencias (Driver, 1981), en el sentido de que son comunes a estudiantes de diferentes edades, niveles educativos, poblaciones y culturas (Doménech, 2000). En la literatura del área se recogen las concepciones de estudiantes procedentes de países muy diferentes entre sí: de la Europa occidental (España, Portugal, Italia, Francia, Reino Unido…), del Próximo y Medio Oriente (Israel, Turquía), de Asia (Corea del Sur y Japón) y de América (Argentina, Méjico, Brasil, Estados Unidos…)

En el apartado anterior se ha comentado que las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje en Termoquímica y Termodinámica Química responden a diversas fuentes, y que por lo general están vinculadas a las formas de razonamiento propias del pensamiento cotidiano. De nuestra revisión preliminar sobre las ideas del alumnado (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008a), observamos varias tendencias comunes a todos los niveles de enseñanza:

Las descripciones e interpretaciones de los alumnos se fundamentan en sus conocimientos del mundo macroscópico, y se observa una escasa integración del dominio microscópico. También es bastante irregular la utilización del léxico científico y de la simbología deseable. En muchos casos, los estudiantes utilizan los términos científicos con los significados propios del lenguaje cotidiano. Si incorporan las nociones termodinámicas a sus estructuras idiosincrásicas de conocimiento, tienden a obviar las limitaciones de sus interpretaciones alternativas. Para que los constructos termodinámicos se hagan accesibles a sus formas de

razonamiento, se conforman con la construcción de razonamientos prototípicos del nivel operacional concreto, en cuyo marco llegan a articular largas y elaboradas explicaciones simplificadoras. También entre los universitarios, muchos evitan el tratamiento multivariable utilizando razonamientos causales lineales y reducciones funcionales (Viennot, 1998; Rozier y Viennot, 1991). E incluso aunque no encuentren satisfactorias estas simplificaciones, no parecen sentir la necesidad de desarrollar razonamientos propios del procesamiento operacional formal necesario para interpretar los procesos naturales (Watson, Prieto y Dillon, 1997): en general, año tras año recurren a las explicaciones causales que aprendieron en los niveles básicos de enseñanza (Boo y Watson, 2001).

Para llegar a construir las interpretaciones de la ciencia escolar, los alumnos deben hacer evolucionar sus ideas en un proceso de aprendizaje que suele verse obstaculizado por problemas de tipo ontológico (Chi, 1992; Chi, Slotta y De Leeuw, 1994), sobre todo si las interpretaciones alternativas están encuadradas en una categoría ontológica inadecuada; entonces el cambio conceptual es radical y, por tanto, mucho más difícil de realizar, puesto que requiere un mayor esfuerzo y más tiempo de trabajo para el que aprende (Chi, 1992; Chi, Slotta y De Leeuw, 1994). El cambio conceptual puede involucrar, además de modificaciones en las categorías ontológicas, también una evolución epistemológica (Vosniadou, 1994; Vosniadou y Ioannides, 1998), esto es, un cambio en los principios que restringen la información, lo que requiere el desarrollo de procesos metacognitivos. Si los requisitos de tiempo y esfuerzo se cumplen, el que aprende puede construir nuevos marcos teóricos de mayor sistematicidad, coherencia y poder interpretativo; de lo contrario, si el cambio conceptual no se completa, lo más frecuente es que se produzca una vuelta al marco teórico previo, sobre todo si no se refuerzan las concepciones nuevas. En algunos casos pasan a coexistir concepciones de diferentes marcos, que pueden utilizarse en contextos distintos, como señala Solomon (1983a) sobre el caso de las ideas alternativas sobre la energía.

Desde los años 70 se han detectado una gran cantidad de ideas de los alumnos (ver, por ejemplo, la revisión de Goedhart y Kaper, 2002, que incluye más de 70 referencias bibliográficas) con varias implicaciones fundamentales para la enseñanza de la Termoquímica y la Termodinámica Química. Pero la mayor parte de la literatura se focaliza en el análisis de las ideas alternativas relacionadas con alguna variable termodinámica concreta o con alguno de los principios termodinámicos y apenas se ofrecen datos cuantitativos sobre la fortaleza de las concepciones alejadas de la ciencia escolar (Sreenivasulu y Subramaniam, 2013). Tampoco se encuentran revisiones de las principales conclusiones que han extraído los distintos investigadores. La única investigación relevante en la que se propone una clasificación de las ideas alternativas es la de (Thomas y Schwenz, 1998), quienes agrupan en seis categorías o temas las principales tendencias que se observan en las interpretaciones termodinámicas de los estudiantes:

- tendencia a definir los conceptos termodinámicos fundamentales de acuerdo con el lenguaje cotidiano,
- tendencia a utilizar los conocimientos informales de la experiencia cotidiana para explicar la termodinámica de los fenómenos químicos,
- tendencia a confundir distintos conceptos termodinámicos,
- tendencia a utilizar conceptos no termodinámicos (por ejemplo, cinéticos) en las interpretaciones sobre la Termodinámica de los procesos químicos,
- tendencia a generalizar los conceptos y principios termodinámicos más allá de las condiciones en las cuales se pueden aplicar, y
- tendencia a errar en la aplicación de los conceptos termodinámicos (asociada a una falta de conocimiento sobre los mismos).

Ya hemos comentado en el apartado anterior cuáles son los principales orígenes de las tendencias que se recogen en las categorías segunda y cuarta de la clasificación de Thomas y Schwenz (1998); las demás mantienen una estrecha relación con un aprendizaje superficial y poco significativo, lo que explica que los alumnos confundan entre sí varios conceptos relacionados, como el calor con la energía interna y la entalpía, la variación de entalpía con variación de entropía, etc. Además, al utilizar sus conocimientos de manera irreflexiva, pocos estudiantes llegan a apreciar las limitaciones de los constructos en los que fundamentan sus razonamientos, y así la mayoría tiende a limitar o extralimitar los ámbitos de aplicación de los conceptos y los enunciados termodinámicos. Algunos no utilizan las magnitudes termodinámicas para interpretar los aspectos energéticos de los procesos, sino que tienden a valerse de conceptos de otras disciplinas, y en particular de la Cinética Química (*Ideas alternativas sobre los criterios de espontaneidad en el estudio termodinámico de los procesos*, pág. 190).

Dado que el objetivo de esta Tesis es elaborar, aplicar y evaluar dos propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química, hemos realizado otra clasificación, en la que las ideas alternativas aparecen categorizadas de acuerdo con los cinco aspectos más destacados de la Termodinámica:

- ideas alternativas sobre la energía de los sistemas,
- ideas alternativas sobre la naturaleza de las transferencias energéticas,
- ideas alternativas sobre el balance de las transferencias energéticas entre el sistema y el entorno en el contexto de las reacciones químicas,
- ideas alternativas sobre la evolución de la distribución energética que experimentan los sistemas durante los procesos, e
- ideas alternativas sobre los criterios de espontaneidad en el estudio termodinámico de los procesos.

Hemos seleccionado estas cinco categorías porque permiten analizar las ideas del alumnado en Termoquímica y Termodinámica Química de acuerdo con una clasificación similar a la que Duit y Häussler (1994) propusieron para el análisis de las concepciones alternativas sobre la energía. Cada una de las cinco categorías de Duit y Häussler se refiere a un aspecto o característica fundamental de la energía: su definición, sus transformaciones, su transporte, su conservación y su degradación. En nuestra clasificación, la primera categoría coincide con la unión de las dos primeras de Duit y Häussler (1994). La segunda engloba los aspectos de transporte y conservación de la energía bajo la denominación genérica "balance de las transferencias energéticas", porque pretendemos analizar a qué dificultades suelen enfrentarse los estudiantes cuando integran sus conocimientos sobre la energía y sus transferencias para interpretar las interacciones entre un sistema material y su entorno. Las ideas sobre la degradación de la energía y su relación con la espontaneidad y la irreversibilidad de los procesos, están incluidas en la cuarta de nuestras categorías, y hemos elaborado la quinta para desglosar los marcos conceptuales y procedimentales alternativos que se han detectado en relación con los criterios que utilizan los alumnos para predecir la espontaneidad de los procesos físicos y químicos.

A continuación se exponen las ideas alternativas del alumnado en el ámbito de la Termoquímica y la Termodinámica Química, desglosadas en cinco apartados, cada uno de los cuales se corresponde con una de las cinco categorías mediante las que sistematizamos los aspectos centrales de la Termodinámica.

Ideas alternativas sobre la energía de los sistemas

A pesar de que se han constatado ideas alejadas de la ciencia escolar incluso entre los universitarios, son pocos los autores que han explorado las concepciones de los alumnos en el contexto de la Química, donde la cantidad de energía que tiene un sistema debido a su estructura se expresa mediante la energía interna.

El primer trabajo bibliográfico que indaga en este tema es el de Granville (1985), al que siguió Ogborn (1986). Tanto éstos como los que se realizaron entre la década de los 90 (Lang da Silveira, Moreira y Axt, 1991; Pintó Casulleras, 1991; Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993; van Huls y van den Berg, 1993; Beall, 1994; Lewis y Linn, 1994; Lang da Silveira y Moreira, 1996; Martínez y Pérez, 1997; Thomas y Schwenz, 1998; Arons, 1999; Carson y Watson, 1999) y en el nuevo siglo (Mirone y Benedetti, 2001; Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini, 2002; Niaz, 2000, 2006; Cervantes Espinosa *et al.*, 2005; Hadfield y Wieman, 2010) se centran sobre todo en las ideas de los estudiantes de nivel universitario.

En todas las investigaciones publicadas hasta la fecha se considera que la principal fuente de origen de las dificultades de aprendizaje sobre la energía interna es la prevalencia de la estructura alternativa de las *formas de energía* (*Las interacciones químicas*, 139). En Química, algunos estudiantes definen la energía interna como una

de las formas que puede adoptar la energía en los sistemas materiales (Carson y Watson, 1999); otras *formas* son la energía de activación, la entalpía o la entropía, que pueden identificarse unas con otras dependiendo del contexto de la tarea. La *forma de energía U* se puede intercambiar con (o convertirse en) otras cuyas características son tan similares a las de la primera, que todas las *formas de energía* de los sistemas tienden a confundirse en un único concepto indeterminado, confuso y ambiguo que se utiliza para explicar los intercambios energéticos involucrados en las reacciones químicas. Si la enseñanza trata de manera superficial la distinción entre las energías cinética, potencial e interna (Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini, 2002), estas ideas alternativas pueden mantenerse o reforzarse.

¿Por qué se sostiene esta concepción de la energía interna? Parece ser que la ausencia de un modelo microscópico sobre la estructura de la materia es lo que más obstaculiza la construcción de la energía interna como una magnitud que da cuenta de las energías cinética, potencial, vibracional, rotacional, translacional, etc. de las partículas del sistema. Esta falta de consciencia microscópica se observa también en las respuestas a actividades en las cuales se sugiere explícitamente a los alumnos que utilicen los conocimientos del dominio microscópico para interpretar la energía de los sistemas (ver Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993; Mirone y Benedetti, 2001). Por ejemplo, según Mirone y Benedetti (2001), solamente 15 de una muestra de 107 universitarios vincularon a la energía de las partículas la energía interna de un sistema compuesto por una sustancia pura en estado sólido, aun cuando el enunciado de la cuestión se formulaba desde un punto de vista microscópico.

Parece que muchos alumnos se limitan a percibir la energía interna como una manifestación visible de los fenómenos térmicos porque adoptan la perspectiva de un espectador cuya precisión observacional es meramente macroscópica. Desde esta perspectiva, pueden ignorar por completo la variación de energía interna del sistema (van Huls y van den Berg, 1993). Cuando analizan los procesos químicos presencian algunos eventos inesperados que no son interpretables desde la fenomenología macroscópica (Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993), porque su mecanismo permanece fuera del alcance de los sentidos. Para que el planteamiento microscópico se haga relevante para estos alumnos, primero deben cambiar su enfoque de observación.

Al no vincular la energía interna con la estructura microscópica de la materia, algunos universitarios establecen identificaciones alternativas entre esta magnitud termodinámica y otras vinculadas a los fenómenos térmicos. Así, pueden considerar la energía interna como un sinónimo de la temperatura, de la entalpía, de la variación de la entalpía o del calor (por ejemplo, Hadfield y Wieman, 2010).

La identificación de la energía interna con la temperatura y el calor es bastante frecuente (Ogborn, 1986; Pintó Casulleras, 1991; Lewis y Linn, 1994; Niaz, 2000, 2006), incluso entre los estudiantes universitarios de Física (Lang da Silveira,

Moreira y Axt, 1991; Lang da Silveira y Moreira, 1996) y de Ingeniería (Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini, 2002). Esta idea alternativa dificulta el aprendizaje de otras magnitudes que son útiles para interpretar los fenómenos térmicos, como el calor latente (involucrado en los cambios de estado y en las transiciones de fase), el calor sensible, la capacidad térmica o la conductividad térmica (que permite estimar la rapidez de las transferencias energéticas por calor). Después de una instrucción explícita a este respecto, los alumnos son capaces de otorgar un *status* más interpretativo a la energía interna, aunque en algunos casos no llegan a definirla como una función de estado del sistema.

Un ejemplo que ilustra las dificultades para superar estas ideas alternativas está en el estudio de Martínez y Pérez (1997) sobre la aplicación de propuestas didácticas para la enseñanza de la Termodinámica básica. A medida que los estudiantes realizaban las actividades de una propuesta diseñada para ayudarles a vincular los conceptos de temperatura y energía interna con un modelo cinético molecular sencillo, lograban una mayor diferenciación conceptual de la energía interna con respecto al calor, y aplicaban la variación de energía interna para explicar los cambios de estado de las sustancias; pero en este nuevo contexto tendían a identificar la energía interna con la temperatura. Similares resultados describen Lang da Silveira, Moreira y Axt (1991) y Lang da Silveira y Moreira (1996), que validaron un *test* para verificar las ideas de estudiantes universitarios de Física sobre calor, temperatura y energía interna. Según estos investigadores, la aplicación de propuestas de enseñanza sobre Termodinámica tiene poca efectividad en el cambio de estas concepciones alternativas. De hecho, entre el *pre-test* y el *post-test* sólo observaron una evolución significativa para el caso del calor, mientras que los conceptos de temperatura y energía interna apenas se acercaron a los de la ciencia escolar.

Parece que la identificación de la energía interna con la variación de entalpía (Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 1999) se construye a través de la noción de calor: si se considera que *U* es lo mismo que la *forma de energía* calor o que la *variación de calor*, igual que la entalpía (Beall, 1994), entonces *U* y *H* pueden llegar a ser casi sinónimas. Algunos las definen como las *formas* en las que se manifiesta la energía de aquellos sistemas que sufren cualquier proceso caracterizado por fenómenos térmicos. Si el proceso tiene lugar a volumen constante, la energía adopta la forma de energía interna, y si se trata de un proceso a presión constante, entonces se manifiesta como entalpía (o variación de entalpía). Para estos alumnos, la energía interna de un sistema depende únicamente de la temperatura (Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini, 2002).

Este tipo de ideas alternativas pueden aparecer también entre el profesorado y con frecuencia se reflejan en los libros de texto, donde por lo general no se analiza la naturaleza ni de las funciones de estado ni de las funciones de la trayectoria. Por ejemplo, en la investigación de Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini (2002) se

confirma la utilización del término "energía térmica" en varios libros de texto como sinónimo de energía interna o de calor.

Si se soslayan los aspectos ontológicos y epistemológicos del conocimiento científico, se reducen las posibilidades de que el alumnado establezca la relación entre la variación de una función de estado y los cambios que sufre el sistema en un proceso (Arons, 1999). La asignación de una categoría ontológica inadecuada a los conceptos de energía interna y calor se observa claramente en manifestaciones como la que sigue, enunciada por un alumno de tercer curso de Ingeniería en el estudio de Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini (2002): "la variación de calor es la energía interna." En esta expresión, la energía interna es un proceso que consiste en la variación de una entidad (el calor), la cual, por tener la capacidad de cambiar de valor, parece ser asignable a un estado del sistema.

Ideas alternativas sobre la naturaleza de las transferencias energéticas

En este apartado resumimos las ideas alternativas que se han detectado sobre los mecanismos por los que se producen los cambios energéticos que acompañan a las reacciones químicas, y sobre la conservación de la energía en el universo, relacionada con el primer principio de la Termodinámica.

Los cambios energéticos asociados a las reacciones químicas han recibido bastante atención de los investigadores en Didáctica de las Ciencias, pero, nuevamente, se han explorado más que nada las ideas sobre las variaciones de las magnitudes termodinámicas, mientras que apenas se dedican estudios a los mecanismos que justifican estas variaciones (ver, por ejemplo: Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a; Hapkiewicz, 1991; Boo, 1998; Barker y Millar, 2000; Boo y Watson, 2001).

Los alumnos suelen reconocer que durante los procesos existen transferencias de energía entre el sistema y el entorno, aunque no lleguen a interpretar el calor y el trabajo como los mecanismos de los intercambios energéticos. Son minoría los que consideran que, por ejemplo, dos objetos a diferente temperatura, una vez puestos en contacto, no tienen por qué alcanzar el estado de equilibrio térmico (Chu *et al.*, 2012).

En general calor y trabajo se asocian a eventos distintos, probablemente porque la enseñanza convencional sólo hace explícita la existencia de cada uno en distintos contextos. El trabajo se suele relacionar con el movimiento de objetos sólidos y masivos, fácilmente observables, y puede que este sesgo contextual tenga que ver con que la mayoría de los estudiantes no contemple la posibilidad de que se realice trabajo en las reacciones químicas. Por ejemplo, antes de la intervención de aula que realizaron Carson y Watson (1999), hubo que preguntar directamente a los alumnos sobre el trabajo que se produce en la reacción entre el magnesio y el ácido clorhídrico; de lo contrario, no manifestaban tener ideas al respecto. Además, ninguno asoció el trabajo con la variación del volumen del gas hidrógeno. Según

ellos, un gas no intercambia energía por trabajo a menos que sea empujado por un pistón. Sí se "hacía trabajo" para romper los enlaces en la molécula de HCl o para ionizar los átomos. En la aplicación de su propuesta didáctica, Carson y Watson (1999) presentaron a los estudiantes el concepto del trabajo $p \cdot \Delta V$ y su relación con la variación de la entalpía del sistema. Después de la instrucción, observaron que se producía un asombroso incremento de la variedad de ideas alternativas sobre la variación de la entalpía, y concluyeron que este resultado se debe al escaso desarrollo de interpretaciones microscópicas sobre los cambios que se producen en los sistemas durante los procesos químicos. Aunque las ideas del alumnado sobre el trabajo $p \cdot \Delta V$ evolucionaron, muchos todavía no visualizaban que un gas es capaz de realizar trabajo contra la atmósfera.

Aun tomando sistemas simples y procesos más sencillos que el de Carson y Watson (1999), la conceptualización del trabajo termodinámico como un trabajo de expansión de gases se ve obstaculizada por las dificultades en el control y exclusión de variables, sobre todo en situaciones que requieren el tratamiento simultáneo de más de dos variables (Loverude *et al.*, 2002; Hadfield y Wieman (2010).

En cuanto a la naturaleza del calor involucrado en los procesos químicos, algunos creen que la energía absorbida o cedida por calor en una reacción química se debe a la transferencia energética desde un reactivo principal o activo hacia otro secundario o pasivo (Greenbowe y Meltzer, 2003).

También se han constatado dificultades en la construcción de una relación adecuada entre las transferencias de energía sistema-entorno y la cantidad de energía total del universo. Antes de detallarlas, debemos indicar uno de los principales obstáculos que dificultan su conceptualización: las confusiones entre el sistema y el entorno (Johnstone *et al.*, 1977; Mirone y Benedetti, 2001; Carson y Watson, 2002; Greenbowe y Meltzer, 2003; Sözbilir y Bennett, 2004a, 2007), que suelen persistir después de la instrucción. Por ejemplo, en la investigación de Johnstone *et al.* (1977), la cuarta parte de los estudiantes de secundaria no distinguen el sistema de los alrededores. Puede suceder que aproximadamente un tercio de una muestra de universitarios que han estudiado Termodinámica sea incapaz de elaborar una definición científica del sistema, que algo menos del 40% identifique cuál es el entorno, y que sólo la quinta parte reconozca el proceso de reacción química objeto de estudio (Greenbowe y Meltzer, 2003); se han observado estas mismas dificultades en estudiantes de Mecánica Cuántica (Carson y Watson, 2002). Entre los que reconocen el sistema objeto de estudio, muchos tienden a ignorar las condiciones que se imponen desde el entorno, lo que suele traducirse en problemas para analizar las transferencias de energía.

En los años 80 ya se había detectado que los alumnos suelen resistirse a aceptar la idea de conservación de la energía en el universo (Brook, Briggs y Driver, 1984; Brook, 1986; Finegold y Trumper, 1989). A la pregunta explícita de qué sucede

con la energía que no se conserva (Brook, Briggs y Driver, 1984), dos tercios de la muestra respondían que se *usaba* o *perdía* durante la reacción. Según los investigadores, este tipo de respuestas puede revelar una aceptación implícita de la degradación de la energía, pero parece en desacuerdo con la idea de conservación (Brook y Driver, 1984; Driver y Warrington, 1984).

Esta concepción alternativa podría deberse a que los sistemas químicos se imaginan como reservorios energéticos o almacenes de energía cuyo contenido de energía los "hace funcionar". En nuestra experiencia cotidiana observamos ejemplos de sistemas químicos que transfieren grandes cantidades de energía al entorno de manera controlada y sostenida (las pilas y baterías, los tanques de combustible…) Al realizar el proceso químico, los sistemas van gastando la cantidad de energía de la que disponen, y a medida que la energía se *utiliza*, disminuye su cantidad dentro del reservorio. El sistema/dispositivo energético deja de funcionar cuando la reserva energética se agota por completo (Ross, 1993). Para que vuelva a funcionar, el sistema-reservorio ha se recargarse con nueva energía. Por ejemplo, algunos alumnos consideran que los seres humanos "recargamos nuestra energía" mediante el descanso y la ingesta de alimentos (Gilbert y Watts, 1983; Gallástegui Otero y Lorenzo Barral, 1993), o que podemos crearla con la actividad física (Solomon, 1983b; Finegold y Trumper, 1989); numerosos estudios revelan cómo los estudiantes creen que la energía se puede crear y destruir (ver, por ejemplo: Kesidou y Duit, 1993; Duit y Häussler, 1994). Estos modelos alternativos se basan en una concepción de la energía como una entidad material o *quasi*-material, y que cuando los alumnos avanzan en sus conocimientos sobre el dominio microscópico de la materia, pueden utilizarlos para apuntalar estos modelos alternativos y hacerlos más plausibles e interpretativos si los complementan con una nueva idea alternativa: que los enlaces químicos son los almacenes microscópicos donde reside la energía del sistema (Kind, 2004a,b).

¿De dónde viene la energía que recarga los sistemas químicos? Desde el ámbito de la Biología y ciencias afines, se constata que los alumnos de secundaria defienden ideas bastante alejadas de la ciencia escolar sobre las fuentes de energía, a las que en algunos casos no diferencian de la energía en sí (Solomon, 1985). También se observan dificultades para diferenciar las fuentes de energía renovables de las no renovables (Bodzin, 2012), y la mayoría no llega a construir una explicación sobre los mecanismos de transporte de energía desde las fuentes hasta los lugares de "consumo" por medio de la red eléctrica.

Desde la Física o la Química se han explorado poco estas cuestiones, pero recientemente se han publicado algunas investigaciones al respecto. Por ejemplo, Sakschewski *et al.* (2014) evaluaron las competencias de los estudiantes en la toma de decisiones sobre algunos aspectos sociocientíficos de la energía, como la generación de electricidad a partir de la energía eólica o el almacenamiento y consumo de energía. Se les animó a utilizar diversos criterios físico-químicos,

ecológicos, económicos y sociales para resolver problemas abiertos sobre estos temas, y se analizó qué estrategias de decisión se activaban. Aunque no han explorado en profundidad la comprensión conceptual del alumnado, sí han observado que las estrategias de decisión más destacadas eran las de tipo espontáneo, intuitivo y compensatorio, y que variaban en gran medida en función de la complejidad de la tarea y de la relación entre los temas científicos que se citaban explícitamente en los enunciados y los "temas", unidades o bloques de contenidos que se contemplan en el *curriculum* y los libros de texto de Alemania.

Volviendo a la conservación de la energía en el universo: para la cuarta parte de los universitarios, la conservación se verifica solamente en aquellos procesos en los cuales no varía la cantidad de energía interna del sistema, es decir, que éste ha de tener la misma cantidad de energía en el estado inicial y en el estado final (Granville, 1985; Thomas y Schwenz, 1998). En otras palabras: conservación de la energía equivale a invariancia energética en el sistema. Algunos aplican esta invariancia a cualquier proceso; y, sin embargo, al mismo tiempo un 60% considera que en condiciones isotérmicas no ocurren transferencias energéticas por calor (Granville, 1985). Quizá el énfasis que pone la cultura escolar tradicional en la manipulación de las ecuaciones químicas refuerza la impresión de que al manipular mecánicamente los símbolos se pueden *conservar* las partículas y la naturaleza de los elementos químicos (Yarroch, 1985) y, por extensión, la energía del sistema.

Mención especial merece otro razonamiento alternativo que construyen algunos alumnos universitarios sobre la invariancia de la energía de un sistema: dado que el entorno abarca el resto del universo, tiene muchísima mayor cantidad de energía que el sistema, y si en el universo la energía se conserva, puede tomarse como aproximación que la variación de energía de cualquier sistema a lo largo de cualquier proceso es cero (Sreenivasulu y Subramaniam, 2013).

También se ha detectado la idea de una *conservación de la energía* que en realidad responde a la de ahorro energético difundida por los medios de comunicación de masas (Watts, 1983). Pero lo más frecuente es que los alumnos dejen de lado la conservación de la energía cuando analizan un proceso físico o químico (Thomas y Schwenz, 1998; Mirone y Benedetti, 2001). En los procesos físicos, como la transferencia de energía entre dos cuerpos sólidos de diferente temperatura en contacto entre sí, son algo menos de la mitad los estudiantes que aplican conocimientos relacionados con el primer principio de la Termodinámica, y solamente un 14% elaboran una interpretación microscópica (Mirone y Benedetti, 2001). En el caso de los procesos químicos, la proporción de los que no hacen explícita la conservación de la energía ronda el 90%, de acuerdo con el estudio de Thomas y Schwenz (1998); entre los alumnos de 14 a 15 años (Finegold y Trumper, 1989) todavía son menos los afirman que la energía se conserva en las reacciones químicas (un 5% según Brook y Driver, 1984).

Si se pide a los estudiantes que definan la *ley de conservación de la energía*, se constata una cierta tendencia a aplicar las acepciones cotidianas de las palabras ley y conservación (Boyes y Stanisstreet, 1990a). A la hora de reconocer las definiciones científicas de estos términos lingüísticos entre una batería de varias expresiones, sólo el 8% de los alumnos de 11-12 años señalaron la acepción de la ciencia escolar, y el porcentaje llega al 33% para los de 15-16 años.

Ideas alternativas sobre el balance de las transferencias energéticas entre el sistema y el entorno en el contexto de las reacciones químicas

Es muy frecuente que los alumnos interpreten los fenómenos térmicos utilizando magnitudes que no coinciden con las científicamente aceptadas. En el contexto de los procesos químicos, la variable termodinámica cuya variación indica el sentido y la extensión de los intercambios energéticos sistema-entorno es la variación de entalpía, sobre la que se han publicado más investigaciones que sobre la variación de la energía interna. En realidad, las ideas alternativas sobre la noción misma de entalpía no están muy exploradas. Sí se encuentran más estudios sobre el significado de la variación de entalpía de un sistema y el sentido de las transferencias energéticas o la espontaneidad del proceso. El primer estudio que trata estos aspectos es el de Johnstone *et al.* (1977), dedicado a las ideas de los estudiantes de secundaria acerca de la entalpía, la entropía y energía de Gibbs. Desde entonces, no se han realizado muchas investigaciones más en este nivel de enseñanza (por ejemplo, Granville, 1985; Barker y Millar, 1996, 2000; Boo, 1998; Thomas y Schwenz, 1998; Boo y Watson, 2001). El número de investigaciones que se ha centrado en las ideas alternativas de los universitarios es bastante mayor (como Beall, 1994; Carson y Watson 1999; Barlet y Mastrot, 2000; Teichert y Stacy, 2002; Greenbowe y Meltzer, 2003; Holman y Pilling, 2004; Cervantes Espinosa *et al.*, 2005; Sreenivasulu y Subramaniam, 2013). Al revisar la literatura encontramos un resultado muy útil para la investigación: la mayoría de los estudios explora los fundamentos microscópicos de las ideas del alumnado (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a; Novick y Nussbaum, 1978; Schollum, 1981; Gilbert y Watts, 1983; Andersson, 1986; Cros, Maurin, Amouroux, Chastrette y Leber, 1986; de Vos y Verdonk, 1986; Gayford, 1986; Hofstein, 1986; Cachapuz y Martins, 1987; Martins y Cachapuz, 1990; BouJaoude, 1991; Hapkiewicz, 1991; Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993; Gallástegui Otero y Lorenzo Barral, 1993; Ross, 1993; Beall, 1994; Barker y Millar, 1996; Selepe y Bradley, 1997; Boo, 1998; Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 1999; Barker y Millar, 2000; Boo y Watson, 2001; Ebenezer y Fraser, 2001; Liu, Ebenezer y Fraser, 2002; Teichert y Stacy, 2002; Greenbowe y Meltzer, 2003; Galley, 2004; Kind, 2004a,b; Sözbilir, 2004a; Ünal, Çalik, Ayas y Coll, 2006; Sreenivasulu y Subramaniam, 2013).

Se ha detectado una gran cantidad y variedad de ideas y estructuras alternativas sobre los intercambios energéticos que tienen lugar entre el sistema y el entorno, y las causas de su origen y permanencia también son múltiples:

Para empezar, las dificultades conceptuales relacionadas con la temperatura, el calor y energía (Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993) repercuten en las nociones de los estudiantes sobre los intercambios energéticos.

Además, la confusión ontológica entre objetos y procesos (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994) también juega un papel importante en la persistencia de las ideas alternativas. El obstáculo ontológico más recurrente parece ser la asignación compartida de la misma categoría ontológica a una magnitud física y a su variación; en ocasiones, una y otra se identifican mutuamente en un único constructo de categoría ontológica poco definida. Los problemas para diferenciar entre el valor de una variable y el cambio en el valor de la misma no se limitan a las magnitudes nuevas para el alumnado, y persisten en los niveles superiores de la enseñanza secundaria (Beall, 1994). Por ejemplo, a decir de Rodrigo Montes Rodríguez, el profesor de Física colaborador en esta investigación, muchos estudiantes de 2º de Bachillerato no advierten que la variación de la temperatura de un sistema representa el cambio que ha experimentado la magnitud temperatura a lo largo de un proceso; de ahí que no sean capaces de calcular ΔT como la diferencia entre los valores final e inicial de temperatura, representativos de los estados entre los cuales se define el proceso. En el caso de la magnitud entalpía H y la variación de entalpía ΔH, esta confusión se puede ver reforzada por los abusos de lenguaje que cometen los profesores cuando llaman a las $\Delta H_{\text{fusión}}$ ó $\Delta H_{\text{formación}}$, respectivamente, entalpía de fusión y entalpía de formación.

Además de estos obstáculos, se presentan otros que tienen que ver con dos tendencias de la enseñanza tradicional, como son el fomento de la concepción dogmática de las magnitudes físicas y el adiestramiento sistemático en la memorización irreflexiva de la información científica. Estas tendencias son las responsables de que los estudiantes se esfuercen casi exclusivamente en evocar los dogmas que han grabado en su memoria, y no es extraño que se olviden por completo de la cantidad de materia y la composición del sistema, de las condiciones en las que tiene lugar el proceso, y en general de cualquier información que no tome la forma de un valor numérico explicitado en el enunciado de la tarea. Con la colección de estos valores numéricos se realizan operaciones matemáticas siguiendo un esquema algorítmico fijado de antemano, en un claro caso de mecanismo de fijación (Furió y Calatayud, 2000; Furió, Calatayud, Bárcenas y Padilla, 2000).

En muchos casos, el adiestramiento irreflexivo en la resolución de ejercicios numéricos sobre el cálculo de variaciones de entalpía tiene una repercusión directa en las concepciones fragmentarias, limitadas o distorsionadas que se han detectado sobre los aspectos energéticos de los procesos naturales. Ya hemos indicado que la resolución de cuestiones numéricas no ayuda a construir los significados científicos de las magnitudes con las que se trabaja en Ciencias (*La materia y su estructura. Las sustancias químicas*, pág. 136). Para la variación de entalpía, el adiestramiento en los

ejercicios algorítmicos mejora el rendimiento en la manipulación de ecuaciones termoquímicas y la realización de operaciones matemáticas sencillas que permiten obtener resultados numéricos, pero no mejora la comprensión de los procedimientos necesarios para responder a problemas de base científica (Carson y Watson, 1999; Teichert y Stacy, 2002). El automatismo en la manipulación de los algoritmos llega a tal punto que eclipsa toda comprensión de la cuestión planteada. Por ejemplo, en el estudio de (Barlet y Mastrot, 2000) se describe que son mayoría los estudiantes que operan correctamente con la expresión de la ley de Hess, pero algo más de la mitad no la enuncia de manera adecuada. Además, casi las tres cuartas partes no saben explicar en qué noción física se fundamenta esta ley empírica, y sólo un 17% llega a identificar la entalpía como una función de estado del sistema.

Al no asociar las cantidades de magnitud y las operaciones matemáticas con sus correspondientes significados científicos, algunos estudiantes no tienen en cuenta las unidades en que se miden las magnitudes sobre las que trabajan, e incluso prescinden sistemáticamente de los signos de los valores numéricos y se limitan a operar con cifras carentes de sentido. Las consecuencias llegan a extremos casi disparatados: un 82%de los alumnos universitarios que participó en la investigación de Greenbowe y Meltzer (2003) obtuvo un resultado inadecuado en la simple manipulación de valores de ΔH a los que debían aplicar únicamente las cuatro operaciones aritméticas básicas. Al analizar las respuestas se observa que muchos no llegaron a calcular la variación de entalpía molar porque no asociaron la liberación neta de energía al entorno con la cantidad de materia del sistema.

También se detecta una clara tendencia a restringir inadecuadamente la validez de la variación de entalpía, que para muchos es un estimador del balance energético sólo aplicable a los tipos de procesos con los que se haya trabajado en clase, que casi siempre son las neutralizaciones ácido-base y las combustiones (Carson y Watson, 1999; Carson y Watson, 2002). Al mismo tiempo que establecen estas limitaciones, es muy posible que no reconozcan la principal restricción de la variación de entalpía (Greenbowe y Meltzer, 2003): ésta solamente equivale a la energía transferida por calor si el proceso tiene lugar en condiciones de presión constante. En otros casos, los estudiantes definen irreflexivamente la variación de entalpía como la cantidad de energía transferida a volumen constante (Sözbilir, 2004a), en una clara confusión con la energía interna que se suele establecer a través del marco alternativo de las *formas de energía*, mediante el cual toda variable termodinámica principal (entalpía, energía interna, entropía y energía de Gibbs) se puede difuminar en un único concepto indistinto.

Pero las identificaciones alternativas van más allá, y también establecen como sinónimos de entalpía o de variación de entalpía el calor, la *variación de calor* o la capacidad calorífica (Beall, 1994); no así el calor latente (Barlet y Mastrot, 2000). Las identificaciones alternativas de este tipo son muy robustas. De hecho, después

de intervenciones de aula en las que se había trabajado explícitamente con la relación conceptual entre calor y temperatura y se presentó explícitamente la entalpía como una función de estado que sirve para cuantificar los intercambios energéticos asociados a un proceso a presión constante, algunos estudiantes seguían considerando que el calor de reacción/ΔH es la variación de temperatura que experimenta el sistema (Greenbowe y Meltzer, 2003). A la hora de calcularlo en una calorimetría, la mayoría aplica la ecuación adecuada ($q = m \cdot c \cdot \Delta T$), pero pocos son conscientes de que en la propia ecuación el calor q y la variación de temperatura ΔT aparecen como términos distintos. Algunos obtienen el valor de q y lo expresan en grados Celsius (Greenbowe y Meltzer, 2003). En el desarrollo de una experiencia calorimétrica, los alumnos de 15-16 años pueden manifestar que el aumento de la temperatura es un resultado o un producto de la reacción (De Vos y Verdonk, 1986).

Parece que en el contexto de los procesos químicos es especialmente difícil para el alumnado aplicar las diferencias conceptuales entre calor, variación de energía y temperatura (Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993). En lo que se refiere al calor específico, tienden a utilizarlo cuando se les pide que describan la facilidad para alcanzar el estado de equilibrio térmico o la eficacia de la conducción de energía por calor a través de un material, pero parece que no sienten la necesidad de aludir a la cantidad de energía transferida durante el proceso (Harrison, Grayson y Treagust, 1999).

Menos exploradas están las ideas alternativas sobre la construcción de diagramas entálpicos asociados a reacciones químicas, aunque se han identificado algunas dificultades al respecto. Por ejemplo, en la investigación de Barker y Millar (2000), cuando se pidió a los alumnos que comentaran el diagrama de energía de la reacción de formación del metano a partir de sus elementos constituyentes, éstos no relacionaron la variación de energía con el proceso de reacción ni con el convenio que asigna el valor cero a la entalpía de los elementos para construir una escala relativa de H. Manifestaron que la variación de entalpía del sistema se debía a la satisfacción de la tetravalencia del carbono, y ninguno la asoció con los aspectos energéticos de la formación y ruptura de interacciones químicas ni con la estabilidad química del producto de reacción. También se mostró a los estudiantes una serie de diagramas de energía y se les pidió que indicaran cuál representaba el proceso de formación del cloruro de sodio. Aunque muchos seleccionaron el diagrama más adecuado al proceso, prácticamente ninguno justificó su elección.

Dado que la manipulación algorítmica irreflexiva de las magnitudes termodinámicas es suficiente para obtener un resultado numérico de ΔH cuyo signo indica el sentido del balance energético de los procesos químicos a presión constante, la mayoría de los alumnos se limita a vincular la exotermia o endotermia de las reacciones en función del signo de ΔH, sin ofrecer una explicación científicamente aceptable (ver, por ejemplo: Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a;

Granville, 1985; de Vos y Verdonk, 1986; Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 1999; Greenbowe y Meltzer, 2003). En algunos casos llegan a elaborar un razonamiento adecuado pero ofrecen una conclusión final errónea. Por ejemplo, son capaces de relacionar el incremento de la temperatura del sistema con la liberación de energía al entorno, después calculan matemáticamente la variación de entalpía y declaran exotérmica la reacción calorimétrica porque su ΔH asociada es negativa (un 71% llegó a este punto)… y al final muchos expresan que la magnitud *calor de reacción* tiene signo positivo (Greenbowe y Meltzer, 2003). En la investigación de Greenbowe y Meltzer (2003), varios de los que ofrecían un razonamiento aparentemente adecuado vinculaban la cantidad de energía transferida por calor con la concentración de la disolución y no con la masa total del sistema, y sólo menos de un 1% hizo explícita la idea de que la energía no se transfiere fuera del calorímetro. Ninguno dijo que las condiciones eran de presión constante.

A nivel universitario, un número elevado de alumnos sigue vinculando automáticamente el signo de la variación de entalpía al sentido del balance energético de procesos que involucran transferencias por procesos de trabajo diferente del $p \cdot \Delta V$ (Granville, 1985); por ejemplo, para interpretar las reacciones electroquímicas, en las que se involucra trabajo eléctrico.

En las tres últimas décadas se han explorado con bastante interés las dificultades en la utilización de conocimientos del dominio microscópico a la hora de construir razonamientos sobre el balance energético de los procesos químicos (por ejemplo, Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a; Novick y Nussbaum, 1978; de Vos y Verdonk, 1986; Thomas y Schwenz, 1998; Greenbowe y Meltzer, 2003; Sözbilir, 2004a; Ünal, Çalik, Ayas y Coll, 2006). La elaboración de justificaciones y predicciones sobre el mundo microscópico es minoritaria en el alumnado de secundaria: según (Boo, 1998), solamente un 15% utiliza los modelos de enlace y reacción química para analizar la exotermia o endotermia de los procesos químicos.

Uno de los obstáculos que se han observado en la interpretación del balance energético sistema-entorno es la falta de conocimientos sobre la naturaleza química de los sistemas (esto es, de los modelos de partículas y de enlace) y de los fenómenos observados (modelos de enlace y de reacción química). Por esta razón, los estudiantes prefieren basar sus interpretaciones en los aspectos perceptibles de los fenómenos, y partiendo de ellos construyen razonamientos de tipo no formal. Esta tendencia se acentúa cuando se les pide que interpreten procesos químicos poco familiares para ellos, como las neutralizaciones ácido-base (Cros, Maurin, Amouroux, Chastrette y Leber, 1986) o las reacciones entre un ácido mineral y un metal (Boo y Watson, 2001). Esta falta de conocimientos se extiende a algunos universitarios, que tienen dificultades para predecir la variación de entalpía asociada a procesos como la solidificación de un líquido o la formación de interacciones electrostáticas entre iones (Sreenivasulu y Subramaniam, 2013).

Si existe una construcción deficiente o inadecuada de modelos científicamente aceptables sobre la naturaleza del enlace químico y los procesos de ruptura y formación de interacciones químicas, no es de extrañar que muchos alumnos no relacionen la variación de energía del sistema con la ruptura y formación de interacciones entre partículas (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a; de Vos y Verdonk, 1986; Boo y Watson, 2001). El porcentaje de los que interpretan inadecuadamente los procesos energéticos asociados a las reacciones químicas puede llegar al 90% (Barker y Millar, 1996), y el argumento mayoritario al que recurren cuando se les pide que apliquen sus conocimientos sobre las interacciones químicas es que los temas de enlace químico y Termodinámica Química no tienen nada que ver uno con otro.

Cuando los alumnos (también los universitarios) no se sienten seguros de sus conocimientos sobre los procesos químicos, tienden a refugiarse en un mecanismo de fijación por el cual adjudican automáticamente el mismo sentido a las transferencias energéticas netas de cualquier proceso de un determinado tipo. Para estos estudiantes, por ejemplo, las variaciones de entalpía de formación son siempre positivas y las variaciones de entalpía de disolución son o todas negativas o todas positivas (Sözbilir, 2004a).

En la literatura se han identificado tres modelos alternativos sobre los aspectos energéticos de las rupturas y formaciones de interacciones químicas:

- La ruptura de enlaces en el sistema libera energía al entorno

Alumnos de diferentes niveles educativos creen que al romper enlaces químicos se libera energía (Hapkiewicz, 1991; Ross, 1993; Barker, 1995 citado por Barker y Millar, 1996). Según Galley (2004), bastantes universitarios comparten esta idea, y afirman que la han aprendido en sus primeros cursos de Química (40%). En el contexto de las reacciones de combustión o de las reacciones metabólicas, se duplica el porcentaje de los que creen que la liberación de energía al entorno se debe a la ruptura de enlaces químicos de los reactivos.

Los orígenes de esta idea alternativa parecen encontrarse en la concepción de las sustancias químicas en general y de los combustibles en particular como reservorios energéticos. En este marco *quasi*-materialista de la energía, el rol de los enlaces químicos es el de esos lugares físicos donde se almacena el contenido energético (Ross, 1993; Barker y Millar, 2000). Para que pueda liberarse la energía almacenada en un enlace, es necesario que éste se rompa (Barker y Millar, 2000), lo cual requiere algún tipo de estímulo asociado con un aporte de energía al sistema, ya sea la acción de una llama o el aporte de temperatura/calor/energía, la incidencia de un rayo de luz, una reacción…

En el caso de las combustiones, algunos alumnos se apoyan en el lenguaje cotidiano para establecer una asociación directa entre el reactivo combustible y la

energía del sistema: los combustibles contienen energía (Ross, 1993). Cuando el combustible reacciona con el oxígeno, se produce una liberación energética que se puede percibir mediante distintos estímulos sensoriales, como un aumento de la temperatura, una expansión de gases, una detonación, una vibración mecánica…

Ya hemos comentado que las transferencias de energía/calor entre el sistema y el entorno se explican como una cesión macroscópica de la energía/calor desde un reactivo que ejerce de agente activo, hacia otro que es una sustancia pasiva en la reacción química (*Los procesos químicos*, pág. 141). Aquí se conectan la idea de los enlaces como reservorio y la del combustible como un agente activo dotado de enlaces *ricos* en energía que se rompen cuando se aplica calor/energía al sistema o se le acerca una llama. El aporte energético es capaz de activar los enlaces del combustible, y así desencadena la reacción. Esta interpretación alternativa es tan común que la mayoría de los estudiantes de 14-15 años considera que cualquier liberación de energía por parte de un sistema químico se debe a la acción de una llama o a una combustión sobre las sustancias reaccionantes (Schollum, 1981; Andersson, 1986; BouJaoude, 1991).

Para justificar la exotermia de muchas reacciones metabólicas, y especialmente la de aquellas en las que interviene el ATP, se tiende a aplicar esta misma estructura alternativa al contexto biológico. Ahora el agente activo es el ATP, que ejerce el papel de un combustible celular (Teichert y Stacy, 2002), y el estímulo que provoca la liberación de la energía contenida en los enlaces del ATP es una reacción de tipo bioquímico (Gayford, 1986). En general, los alumnos consideran que el oxígeno "no contiene energía química" y que por este motivo ejerce de ente pasivo en las reacciones metabólicas, mediante las cuales los alimentos transforman la energía química que contienen en «energía calorífica más dióxido de carbono y agua cuando reaccionan con el oxígeno» (Boo, 1998). El hecho de que estas reacciones establezcan rutas metabólicas se explica mediante un razonamiento sinérgico: ciertas reacciones que tienen lugar en los seres vivos producen energía, y de ella disponen las células para su actividad; ésta a su vez ha de generar más energía para que las células sigan vivas.

Este tipo de ideas alternativas aparece repetidamente en varios libros de texto de Biología y Bioquímica (Johnstone *et al.*, 1979; Gayford, 1986; Hofstein, 1986; Hapkiewicz, 1991; Cohen y Ben-Zvi, 1992; Storey, 1992; Galley, 2004), que incluyen expresiones como «el enlace de fosfato, altamente energético» o «la energía atrapada en el enlace de fosfato (…) [es] liberada cuando se rompe el enlace».

La gran labilidad de esta estructura alternativa explica que resista tan bien el cambio conceptual (Hapkiewicz, 1991; Ross, 1993; Kind, 2004a,b): se la puede transferir fácilmente a distintos contextos y condiciones para interpretar fenómenos tan familiares como la nutrición o el funcionamiento de muchas máquinas de uso cotidiano (Gallástegui Otero y Lorenzo Barral, 1993).

- La formación de enlaces requiere que se aporte energía al sistema

Esta idea suele aparecer asociada a la anterior, a la cual es complementaria. La coordinación de las dos aporta una gran estabilidad al modelo energético de enlace formado por ambas (Hapkiewicz, 1991; Ross, 1993; Barker y Millar, 1996; Boo, 1998; Barker y Millar, 2000; Boo y Watson, 2001; Sözbilir, 2004a; Ünal, Çalik, Ayas y Coll, 2006). De hecho, responden a la misma vía de razonamiento, una en sentido contrario a la otra: si los enlaces son uniones físicas donde se localiza la energía, y se necesita energía para construir cualquier estructura física, entonces para formar enlaces también se necesita energía, que se aporta desde el entorno (Boo, 1998; Boo y Watson, 2001). Ahora entra en juego el razonamiento inverso: formados los enlaces, la energía que fue aportada al sistema permanece almacenada en ellos mientras sean estables, y se libera cuando los enlaces se rompen.

Está claro que las ideas alternativas sobre el calor y las fuentes de energía influyen en la permanencia de estas estructuras alternativas sobre los aspectos energéticos de la ruptura y formación de enlaces químicos (Ben-Zvi, Silberstein y Mamlok, 1993). Las ideas de la ciencia escolar, muy abstractas, son poco aceptadas entre los alumnos de la enseñanza secundaria. Según Barker (1995), citado por Barker y Millar (1996), solamente un 6% de los estudiantes de 16 años la utiliza.

- La ruptura y la formación de enlaces requieren un aporte de energía

Aunque la coexistencia de estas dos ideas parece una paradoja, se puede construir un razonamiento que las compatibiliza, si se considera que la ruptura de los enlaces químicos se produce en dos etapas:

La primera etapa requiere un aporte de energía inicial, para que se rompan los primeros enlaces de los reactivos. En la segunda etapa, la energía que se liberó como consecuencia de la ruptura de estos enlaces se invierte ahora en la ruptura de más enlaces (Ross, 1993; Boo, 1998; Barker y Millar, 2000; Boo y Watson, 2001; Ebenezer y Fraser, 2001).

Esta idea también es extraordinariamente resistente al cambio conceptual; pero su origen es diferente de las dos anteriores, porque parece encontrarse en la conciliación de la primera idea alternativa que hemos descrito (*la ruptura de enlaces produce una liberación de energía*) con una idea de la ciencia escolar: la ruptura de interacciones químicas requiere un aporte de energía. La literatura en Didáctica de las Ciencias advierte que no es infrecuente la superposición de concepciones alternativas y nociones científicamente aceptables (Gilbert y Watts, 1983).

Son minoría los alumnos que utilizan un modelo unificador para explicar los fenómenos energéticos asociados a cualquier reacción química (Boo, 1998); incluso cuando sostienen varias ideas adecuadas muy relacionadas entre sí, como "los enlaces son estables, y no tienen un nivel de energía elevado" y "se requiere energía para romper interacciones", no necesariamente llegan a integrarlas en un único

modelo de enlace. Por lo general se suelen manifestar modelos alternativos fragmentarios e incoherentes sobre los intercambios microscópicos de energía, en el sentido de que para unos procesos químicos se aplica una estructura alternativa, y para otros, otra distinta (Teichert y Stacy, 2002). Parece que tanto las informaciones perceptibles de las tareas como el tipo de fenómeno y el orden en el que se observan los fenómenos, influyen notablemente en los modelos que se activan en cada caso (Ebenezer y Fraser, 2001). Al intentar la construcción de un modelo alternativo único, los estudiantes tienden a poner en juego ideas que se contradicen entre sí. Por ejemplo, pueden considerar que los átomos establecen un enlace químico para alcanzar un estado de menor energía que los átomos sin enlazar; y pueden al mismo tiempo afirmar que se libera energía al romperse el enlace (Teichert y Stacy, 2002).

Si no se visualizan las reacciones químicas como procesos dinámicos en los que simultáneamente se forman y rompen interacciones, la manera más sencilla de justificar el balance energético global es construir una cadena de razonamientos causales organizados en secuencia lineal, independientemente de si el proceso es relevante o no para los alumnos. Por ejemplo, se ha constatado una tendencia a interpretar la ebullición de un líquido covalente como un proceso en dos etapas (Barker y Millar, 2000): una primera en la que se rompen los enlaces, y una segunda en la que se vuelven a formar.

Cuando se enfrentan a procesos poco familiares, como es el caso de las disoluciones o de los procesos endotérmicos (que la enseñanza tradicional tiende a ignorar), aparecen las mayores dificultades para conciliar las diferentes estructuras alternativas, aunque en general los estudiantes prefieren identificar las nuevas reacciones con las ya conocidas. Así, por ejemplo, casi un 10% de una muestra de alumnos universitarios de Ingeniería interpretó el proceso de disolución de una sal iónica como la fusión de la sal y, en consecuencia, la variación de temperatura de la disolución se justificó por la energía que se absorbe en un cambio de estado progresivo (Liu, Ebenezer y Fraser, 2002). La mayoría (un 83%) asoció los fenómenos térmicos a la acción de partículas microscópicas, ya sean iones o moléculas. Sin embargo, algunos manifestaron ideas muy alejadas de la ciencia escolar, como la atribución de propiedades macroscópicas a entidades microscópicas. Un ejemplo: que los enlaces químicos de las sustancias sólidas son más *fuertes* que los de las sustancias líquidas, y en consecuencia se debe aportar una mayor cantidad de energía para disociarlos. Otra identificación alternativa entre procesos diferentes es la asimilación de la disolución de una sustancia con la disociación de la misma (Sözbilir, 2001, citado en Sözbilir, 2004a). Parece que ésta es la causa de que muchos confundan la variación de entalpía de red con la variación de entalpía de hidratación cuando construyen un ciclo de Born-Haber.

Si los alumnos visualizan los procesos químicos como una secuencia lineal de etapas, son capaces de construir interpretaciones simplificadas que les parecen muy funcionales. Lo más frecuente es que las etapas en las que dividen las

reacciones químicas consistan en rupturas o formaciones masivas de enlaces químicos, o en choques masivos de determinados tipos de partículas entre sí mientras las demás partículas esperan su turno. Por ejemplo, cualquier proceso de disolución puede interpretarse como una transformación en dos etapas. La literatura ha descrito varias interpretaciones ligeramente diferentes para cada una de las dos etapas, en función de las ideas sobre la naturaleza química del soluto y el disolvente; pero, en esencia, estas interpretaciones no son más que variantes del mismo modelo alternativo (Ebenezer y Fraser, 2001; Liu, Ebenezer y Fraser, 2002).

En el caso del disolvente agua y el soluto sal iónica binaria, la primera etapa acepta dos variantes: o bien consiste en la "activación" de la energía del agua debido a la presencia de los cristales en su seno, o bien se produce una ruptura de los "enlaces" del agua (y con ello pueden referirse a las interacciones intermoleculares del agua o a los enlaces covalentes H–O de la molécula H_2O). Al pedirles que señalen cuál es la fuente que proporciona la *energía térmica* necesaria para romper los enlaces iónicos de los cristales de sal, la respuesta mayoritaria, con un 76% de frecuencia en Ebenezer y Fraser (2001), y un 55% en Liu, Ebenezer y Fraser (2002), es que tal energía procede de la ruptura de interacciones en el disolvente. Menor aceptación tienen otras interpretaciones alternativas, y entre ellas destaca la idea de que el agua contiene una energía que *se activa* cuando se le añaden cristales de sal. Unos pocos consideran que es el investigador quien aporta la energía, ya sea porque agita la mezcla de disolución o porque cede energía de la mano con la que sostiene el recipiente. Cuando termina la primera etapa de la secuencia lineal, comienza la segunda, que consiste en la hidratación de los iones disueltos, con la consiguiente liberación de la energía contenida en los enlaces del cristal que se desmorona. Esta energía se puede invertir ahora en reaccionar con el agua, o en atraer o repeler moléculas de agua, o en disminuir el nivel de energía para alcanzar un estado más estable… En todo caso, la primera etapa sería endotérmica y la segunda, exotérmica.

Muchos alumnos de 17 años también interpretan las reacciones químicas endotérmicas como procesos en dos etapas (Cachapuz y Martins, 1987). En la primera, el sistema absorbe una cantidad de energía que se emplea en romper enlaces. Después, durante la segunda etapa, se produce una liberación de energía al entorno, que se puede justificar como consecuencia de la ruptura de más enlaces, o mediante la formación de enlaces nuevos. La cantidad de energía absorbida en la primera etapa es mayor que la cantidad de energía que se libera en la segunda, y, como resultado, la reacción es endotérmica.

También se han detectado concepciones alternativas por las cuales las reacciones endotérmicas y las exotérmicas obedecen a mecanismos diferentes o se activan mediante fuentes de energía diferentes (Sözbilir, 2001, citado en Sözbilir, 2004a). Probablemente sea este razonamiento el que respalda la idea de que solamente las reacciones exotérmicas tienen asociada una "verdadera" variación de entalpía (Carson y Watson, 1999).

Algunos estudiantes no asocian los conceptos de exotermia y endotermia con el balance global de los procesos termodinámicos, y para ellos cualquier reacción química es endotérmica porque todas requieren un aporte inicial de energía (de Vos y Verdonk, 1986; Boo, 1998), combustiones incluidas; aunque en éstas el sistema libera mucha energía al entorno, para iniciar la reacción se necesita calor/energía/entalpía. Un ejemplo: para que comience la combustión de la cera de una vela, primero se debe encender la vela aportando energía al sistema mediante una llama. La energía aportada se define como calor, o sea, «la energía que se añade a algo» (un 42% defiende esta idea, según Thomas y Schwenz, 1998), o como variación de entalpía, es decir, «la energía que se aporta a la reacción» (en torno a la mitad de los universitarios entrevistados por Carson y Watson, 1999).

Además, se han identificado algunas conexiones alternativas entre constructos termodinámicos y cinéticos. En particular, muchos alumnos relacionan el balance energético asociado a una reacción química con la espontaneidad de la misma (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a; Beall, 1994; Boo y Watson, 2001; Selepe y Bradley, 1997) o con la velocidad de reacción: los procesos exotérmicos (o los endotérmicos) suceden a mayor velocidad (Beall, 1994). Según Sözbilir (2004a), la cuarta parte de los estudiantes defiende esta idea.

Ideas alternativas sobre la evolución de la distribución energética que experimentan los sistemas durante los procesos

Desde hace varias décadas, se ha refutado la idea de que el motor de los procesos sea la minimización de la energía del sistema, y la actual interpretación de la espontaneidad se basa en un análisis mecanocuántico y estadístico de los cambios que se producen en la distribución microscópica de la energía. Para predecir hacia dónde evolucionan los sistemas en unas condiciones dadas, se comprueba cuántos microestados energéticos se ven favorecidos (se hacen más probables) y, por tanto, qué tipo de transferencias energéticas se impulsarán, de tal manera que la dispersión energética haga aumentar el desorden termodinámico del universo.

No resulta fácil desarrollar estas nociones en el Bachillerato actual, al menos en España, donde el desarrollo del *curriculum* de Ciencias a lo largo de la ESO es bastante lento, y las pruebas de Selectividad imponen marchas forzadas a los programas de 2º de Bachillerato (Pastor, 2003; Pro, 2007). Sin embargo, se ha demostrado que el desorden termodinámico, la entropía y el segundo principio de la Termodinámica son asequibles para el alumnado de enseñanza secundaria (ver, por ejemplo: Pintó Casulleras, 1991), aun cuando prácticamente todos los expertos están de acuerdo en que estos constructos escriben el capítulo más difícil de la Termodinámica Química (Stylianidou y Boohan, 1998; Mirone y Benedetti, 2001).

Los resultados obtenidos por los investigadores en Didáctica de las Ciencias dibujan un panorama poco alentador: muchos alumnos que estudiaron estas nociones en cursos anteriores afirman que no las recuerdan en absoluto (Thomas y

Schwenz, 1998), y la instrucción encaminada a hacer evolucionar sus ideas hacia las de la ciencia escolar es en general poco efectiva a largo plazo en lo que se refiere a la interpretación de la irreversibilidad y la espontaneidad de los procesos naturales, aunque se observan progresos significativos en algunos casos (Boo y Watson, 2001; Mirone y Benedetti, 2001).

Las ideas alternativas que se han detectado sobre las nociones vinculadas al segundo principio de la Termodinámica y a la espontaneidad y la irreversibilidad de los procesos son muchas y muy variadas, pero se les ha dedicado poco espacio en la literatura del área. En cambio, la entropía y el desorden termodinámico sí han sido objeto de una gran atención. No todos los *curricula* recogen explícitamente la recomendación de trabajar en el aula la noción de irreversibilidad de los procesos naturales, lo que influye en los contenidos de aprendizaje y en los objetivos que se persiguen con la enseñanza.

Dada la amplitud de los resultados que derivan de la investigación, exponemos en distintos apartados aquellas ideas alternativas que se relacionan, por un lado, con la entropía y el desorden termodinámico, y por otro lado, con la espontaneidad, la irreversibilidad y el segundo principio de la Termodinámica.

Ideas alternativas sobre la entropía y el desorden termodinámico

No cabe duda de que la entropía es el concepto termodinámico que más publicaciones ha centrado en la literatura científica (Stylianidou y Boohan, 1998), tanto por la discusión epistemológica que ha generado (*Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 202) como por la variedad de ideas alternativas que a ella se refieren y la resistencia de éstas al cambio. La comunidad investigadora en Didáctica de las Ciencias se ha volcado en sistematizar las ideas de los alumnos sobre la entropía (Johnstone et al, 1977; Granville, 1985; Valhov y Treagust, 1988; Boyes y Stanisstreet, 1990b; Pintó Casulleras, 1991; Abraham *et al.*, 1992; Ribeiro, 1992; Kesidou y Duit, 1993; Tomanek, 1994; Selepe y Bradley, 1997; Thomas y Schwenz (1998); Carson y Watson, 1999; Lambert, 1999; Bindel, 2000; Boo y Watson, 2001; Mirone y Benedetti, 2001; Carson y Watson, 2002; Lambert, 2002a,2002b; Bindel, 2004; Sözbilir, 2004a; Lambert, 2005b; Sözbilir y Bennett, 2007; Bodzin, 2012; Sreenivasulu y Subramaniam, 2013). Los propios estudiantes reconocen que los conceptos que más les cuesta entender son la entropía y la energía de Gibbs (Ribeiro *et al.*, 1990; Pintó Casulleras, 1991; Banerjee, 1995; Selepe y Bradley, 1997; Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2003; Sözbilir y Bennett, 2007), y la instrucción parece no salir al paso de la generación de nuevas ideas a medida que se profundiza en las relaciones termodinámicas avanzadas (Sözbilir y Bennett, 2007).

Entre las principales dificultades que se observan en el aprendizaje de la noción de entropía está la tendencia de los alumnos a contentarse con las formas simplificadoras de razonamiento propias de los primeros cursos de Ciencias. A

medida que avanza el nivel de complejidad de los contenidos conceptuales y procedimentales, se asimilan los nuevos constructos termodinámicos sobre la base de las concepciones alternativas, con lo que logran un cierto grado de conciliación entre unos y otras. Por ejemplo, para explicar los mecanismos que hacen posible la espontaneidad de las reacciones químicas en unas condiciones dadas (lo que el mundo anglosajón denomina la *driving force* de las reacciones), suelen elaborar razonamientos de tipo aditivo en los que se combinan agentes causales de diversa índole (Boo y Watson, 2001). Cuando no son capaces de distinguir ningún agente perceptible, tienden a recurrir a los conocimientos cotidianos (Kesidou y Duit, 1993). Es frecuente que el cambio conceptual implique necesariamente una reasignación de categoría ontológica (Chi, 1992; Chi, Slotta y De Leeuw, 1994).

En el caso de la entropía, como sucede con los demás constructos termodinámicos avanzados, las investigaciones prefieren indagar en las ideas del alumnado universitario (Carson y Watson, 2002), que también tiene dificultades para interpretar los aspectos entrópicos de los procesos y para utilizar el segundo principio de la Termodinámica (Pintó Casulleras, 1991). De hecho, algunos universitarios reconocen haber utilizado la palabra "entropía" en cursos anteriores, pero no recuerdan su significado (Carson y Watson, 2002). Esto mismo sucede en secundaria (Thomas y Schwenz, 1998), donde un 87% no define adecuadamente la entropía desde el punto de vista macroscópico.

Las principales ideas alternativas que se describen en la literatura sobre la noción de entropía son las siguientes:

- La entropía como forma de energía (en ocasiones sinónima de la entalpía)

Aunque la identificación entalpía-entropía suele producirse por la asimilación de ambas como *formas de energía*, en algunos casos parece más el resultado de un aprendizaje superficial unido a una confusión terminológica: «Me confundo con la entalpía como que es [por ejemplo la entropía] otra palabra para la entalpía» (Carson y Watson, 1999).

- La entropía y sus confusas relaciones con desorden termodinámico, caos…

Sin duda, las ideas alternativas más extendidas sobre la entropía son aquéllas que la relacionan con el desorden del sistema. La literatura describe una rica variedad de matices a este respecto, que tienen mucho que ver con una concepción del desorden termodinámico alejada de la ciencia escolar (Ribeiro, 1992). La primera publicación que trató este tema fue la de Johnstone *et al.* (1977), y desde entonces varias investigaciones han puesto de manifiesto distintas relaciones alternativas entre la entropía y el desorden:

Las definiciones alternativas de entropía más populares son las de "desorden" (Selepe y Bradley, 1997; Sözbilir y Bennett, 2007), "caos" (Johnstone *et al.* 1977; Selepe y Bradley, 1997; Carson y Watson, 2002; Sözbilir y Bennett, 2007),

"aleatoriedad" (Carson y Watson, 2002) e "inestabilidad" (Sözbilir, 2001, citado por Carson y Watson, 2002). Más que una auténtica diversidad de definiciones, estamos ante una colección de acepciones del "desorden", que en algunos casos se puede interpretar como caos (*chaos*), en otros como aleatoriedad (*randomness*) o inestabilidad del sistema (*instability*).

Ninguna de estas acepciones alude al desorden termodinámico tal como lo entienden los científicos, sino que todas se refieren a un desorden visuo-espacial de las partículas del sistema, casi nunca explícito (Johnstone *et al.* 1977; Selepe y Bradley, 1997; Carson y Watson, 2002; Sözbilir y Bennett, 2007). Según investigaciones realizadas en el nivel universitario, como las de Sözbilir (2001), citado en Sözbilir y Bennett (2007) y Carson y Watson (2002), ningún alumno apela a una conexión entre el *desorden* del sistema y los microestados de energía disponibles para las partículas.

Según varios autores, detrás de la variedad terminológica con la que los alumnos expresan la noción de desorden están las identificaciones alternativas de éste con la variación de la temperatura del sistema (Selepe y Bradley, 1997; Sözbilir, 2001, citado en Sözbilir y Bennett, 2007) o con el movimiento y la colisión de las partículas (Abraham *et al.*, 1992; Sözbilir, 2001, citado en Sözbilir y Bennett, 2007). Por extensión, el desorden puede calificarse también como un alto grado de mezcla en un sistema (Carson y Watson, 2002; Sözbilir y Bennett, 2007) o con el aumento del grado de mezcla (*mixed-upness systems*).

Pero la relación de la entropía con el desorden no siempre consiste en una identificación ("la entropía es el desorden del sistema") o una equivalencia ("la entropía es igual al desorden del sistema"). También se han detectado otras dos ideas alternativas. La primera y más común consiste en la definición de la entropía como una medida del desorden del sistema (Johnstone et al, 1977; Ribeiro, 1992; Selepe y Bradley, 1997; Sözbilir, 2001, citado en Sözbilir y Bennet, 2007). Menos frecuente es la segunda, por la que se considera que la entropía es la causa del desorden que tiene el sistema (Selepe y Bradley, 1997, Sözbilir 2007). En algunos casos, los alumnos relacionan *S* con el orden en vez de con el desorden (Sreenivasulu y Subramaniam, 2013).

Los enfoques actuales de la enseñanza no parecen salir al paso de estas dificultades; al contrario, en muchos libros de texto se define abiertamente la entropía como la medida de desorden del sistema, y los profesores suelen utilizar modelos analógicos macroscópicos que refuerzan la concepción del desorden visual y la entropía como sinónimos (Lambert 1999, 2002a, 2002b, 2005b; Bindel, 2000, 2004; Sözbilir y Bennett, 2007). Algunos textos ni siquiera llegan a ilustrar qué entienden por desorden, lo que también dificulta la construcción de las dependencias que presenta la entropía con respecto a la temperatura, la naturaleza química (composición) y la cantidad de sustancia del sistema.

En el apartado *Enfoques y metodologías en la enseñanza de la Termodinámica* (pág. 198) se discuten las deficiencias de los enfoques actuales de la enseñanza, así como las principales propuestas que han elaborado los investigadores en Didáctica de las Ciencias para ayudar a la construcción de la entropía como una función de estado que mide la dispersión de la energía (o desorden termodinámico) y la disponibilidad de los microestados energéticos.

- La entropía y la energía cinética de las partículas del sistema

También se ha detectado una tendencia a relacionar inadecuadamente la entropía y la energía cinética de las partículas del sistema (Johnstone et al, 1977, Selepe y Bradley, 1997, Sözbilir 2001, citado en Sözbilir y Bennett, 2007; Carson y Watson, 2002), a través de razonamientos poco científicos sobre el *desorden*:

El razonamiento más frecuente establece que el desorden del sistema es mayor cuanto más se incrementa la energía, o cuantos más choques entre partículas hay (Ribeiro, 1992; Selepe y Bradley (1997) y Sözbilir (2001), citado por Sözbilir y Bennett, 2007). Por ejemplo, Sözbilir y Bennett, (2007) retomaron una actividad de Selepe y Bradley (1997) en la que se pedía a los alumnos que comparasen los valores de entropía de dos sistemas gaseosos químicamente puros (CO_2 y propano) que se mantenían a la misma temperatura. Siete de cada diez respondieron que el CO_2 tiene un valor mayor de entropía, porque presenta un mayor número de colisiones y de interacciones intermoleculares.

Entre los universitarios también se observan estas ideas. Según Sreenivasulu y Subramaniam (2013), algunos afirman que los sólidos elementales o los puros, amorfos o cristalinos, tienen un valor cero de entropía porque en ellos no existe desorden/libertad/movimiento.

Otro razonamiento recurrente pasa por una identificación de la entropía con la temperatura. En el año 1977, Johnstone *et al.* exploraron las ideas del alumnado sobre la entropía utilizando un sencillo experimento acerca de una banda elástica que primero se tensaba y después de destensaba. Aproximadamente la mitad de los estudiantes consideró que la entropía de la banda aumentaba porque (al contrario del punto de vista científico) predecían que la temperatura debía incrementarse con la contracción del sistema y no con el estiramiento.

- La entropía y los microestados disponibles para las partículas del sistema

Ribeiro (1992) exploró las ideas de alumnos universitarios portugueses del último curso de Química, sobre la entropía y el segundo principio de la Termodinámica. La mayoría recordaba la palabra microestado, pero muy pocos la interpretaban como un modo de reordenamiento energético permitido para las partículas del sistema. Tendían a considerar que un microestado es un *pequeño estado* sin relación alguna con el concepto de entropía. También Sözbilir y Bennett (2007) encontraron esta idea entre los universitarios turcos.

En la intervención de aula que realizaron Carson y Watson (2002), introdujeron el concepto de microestado para analizar las posibilidades energéticas microscópicas que puede tener un sistema en unas condiciones dadas. Observaron que, a medida que avanzaba la intervención, los estudiantes generaban más explicaciones científicamente aceptables, pero al mismo tiempo crecía también el número de concepciones alternativas sobre la energía. Aunque se presentó explícitamente la relación de la entropía con la distribución energética de los niveles disponibles, la práctica totalidad de la muestra prefirió seguir basando sus interpretaciones en las ideas de aleatoriedad y desorden espacial de las partículas. Casi ningún alumno llegó a aplicar otras ideas en sus explicaciones y predicciones sobre las reacciones químicas. Estos resultados están en consonancia con los de Sözbilir y Bennett (2007), en cuya investigación ningún estudiante aludió a los microestados para explicar el *desorden* que identificaban con la entropía del sistema. A pesar de que la instrucción se había encaminado sobre todo a la construcción de relaciones conceptuales, la obtención de valores numéricos predominó sobre la elaboración de interpretaciones, la mayoría del dominio macroscópico.

Las ideas expuestas hasta este punto son la base de las interpretaciones alternativas que se construyen para interpretar las variaciones de entropía que experimentan los sistemas durante los procesos físicos y químicos. La noción visual de *desorden* rige las descripciones, explicaciones y predicciones microscópicas, de tal manera que los alumnos se encuentran cómodos explicando las variaciones de la entropía asociadas a procesos en los que se producen grandes cambios en la distribución energética (y, por tanto, también espacial) de las partículas.

Destaca el caso de los cambios en el estado de agregación de las sustancias puras. Al conceptualizar las partículas como entidades concretas cuya posibilidad de distribución en el espacio es diferente en cada estado de agregación, los estudiantes son capaces de imaginar sin dificultad los incrementos de entropía asociados a los cambios de estado progresivos (Carson y Watson, 2002; Sözbilir y Bennett, 2007). La facilidad de interpretar estos procesos los anima a utilizar sus conocimientos sobre las partículas, y de hecho se observa que en las descripciones, justificaciones y predicciones sobre estos procesos sí activan relaciones del dominio microscópico, y tienden a ensamblarlos en un modelo analógico concreto relacionado con el modelo cinético molecular (Carson y Watson, 2002).

Utilizando razonamientos parecidos, son capaces de explicar otros procesos físicos, como la difusión de dos gases que genera una mezcla homogénea. El aumento de entropía del sistema se explica casi siempre en términos del "desordenamiento visual" de las partículas Johnstone *et al.* (1977). En algunos casos, manifiestan que la variación de entropía demuestra que se han producido transferencias de energía; para estos alumnos, ΔS ofrece una prueba de que se ha realizado un trabajo sobre el sistema (Selepe y Bradley, 1997).

El número de investigaciones en Didáctica de las Ciencias parece suficiente como para elaborar un listado de las principales ideas alternativas sobre las variaciones de entropía que experimentan sistema y universo durante los procesos que tienen lugar en contextos físicos o químicos (Ribeiro, 1992; Sözbilir y Bennett, 2007). En el ámbito de la Biología hay pocos estudios en los que se exploren las concepciones del alumnado; nos referiremos a la publicación de Tomanek (1994), en la cual se exponen las principales ideas alternativas que se detectaron en una clase de Ciencias del Medioambiente de la educación secundaria, sobre los procesos básicos de la ecología.

Éstas son las principales ideas alternativas que sostienen los alumnos sobre los cambios de entropía asociados a los procesos físicos, químicos y biológicos:

- ¿Cómo es la variación de entropía de los sistemas materiales?
  - Si un sistema aislado experimenta un proceso físico o químico, la variación de la entropía del sistema siempre es mayor o igual a cero (Ribeiro, 1992; Sözbilir, 2001, citado por Sözbilir y Bennett, 2007).
  - La variación de entropía de un sistema es siempre positiva en los procesos físicos o químicos (Granville, 1985; Ribeiro, 1992; Thomas y Schwenz, 1998). También en los procesos biológicos, porque el mantenimiento de los sistemas vivos aumenta la entropía (Tomanek, 1994).
  - Un sistema tiende siempre a evolucionar en el sentido en que se alcanza su valor máximo de entropía (Ribeiro, 1992).
  - Una vida de alto consumo hace aumentar la entropía, y una reducción de las cantidades de desperdicios generados (tanto de materia como de energía), es capaz de reducir la entropía (Tomanek, 1994). Recordemos que las ideas del alumnado sobre el uso social de la energía son bastante limitadas en lo cuantitativo y en lo cualitativo, y tanto en adolescentes como en adultos (Valhov y Treagust, 1988). La mayoría no llega a identificar las principales fuentes de consumo energético en los sectores doméstico, industrial/comercial y de transporte, ni los recursos naturales de donde se extrae energía (Boyes y Stanisstreet, 1990b), ni los patrones de consumo personal y social. Por ejemplo, poco más del 20% de los estudiantes estadounidenses de enseñanza secundaria identifican el petróleo como el recurso energético de mayor difusión en su país (Bodzin, 2012).
  - La variación de entropía de un proceso adiabático es cero (Granville, 1985), independientemente de si el proceso es reversible o irreversible.
- ¿Cómo es la variación de entropía del universo?
  - a) Como consecuencia de cualquier proceso físico o químico, la entropía del universo no varía; en algunos casos, decrece (Ribeiro, 1992).

- b) Al aumentar la *velocidad de la entropía*, disminuye la cantidad de materia y de energía útil para el ser humano (Tomanek, 1994).

Antes de dar por terminada esta revisión de las ideas alternativas sobre la entropía, hemos de señalar que uno de los obstáculos que más dificultan su conceptualización y la de la espontaneidad, la irreversibilidad y el segundo principio de la Termodinámica es la confusión entre el sistema y el entorno (Carson y Watson, 2002; Sözbilir y Bennett, 2004a, 2007). Obviar las condiciones a las que el entorno somete al sistema también se traduce en problemas para construir la relación entre la variación de entropía del sistema y la del entorno (Sözbilir y Bennett, 2007). Por ejemplo, si no analizan la relación entre el sistema y sus alrededores, los alumnos pueden afirmar que un sistema abierto o cerrado no experimenta una variación de entropía (Mirone y Benedetti, 2001), afirmación que solamente es válida para los sistemas aislados.

A continuación pasamos a resumir las ideas alternativas sobre la espontaneidad y la irreversibilidad de los procesos, así como su relación con las concepciones del segundo principio de la Termodinámica.

Ideas alternativas sobre la espontaneidad y la irreversibilidad de los procesos, y el segundo principio de la Termodinámica

Una de las primeras dificultades que hay que superar para construir los conceptos científicos de espontaneidad e irreversibilidad es identificar como tales las acepciones cotidianas de estos términos, distintas de las acepciones científicas.

La literatura de investigación en Didáctica de las Ciencias pone de manifiesto que muchos alumnos dan a los términos espontaneidad e irreversibilidad significados que coinciden con, o se aproximan a, los del lenguaje cotidiano (Ribeiro, Pereira y Maskill, 1990; Ross, 1993; Thomas y Schwenz, 1998; Mirone y Benedetti, 2001; Sözbilir, 2004a). En el caso de la irreversibilidad, solamente un 12% utiliza el significado científico del término (Thomas y Schwenz, 1998), mientras que para la inmensa mayoría un proceso es irreversible en el sentido de que es irrevocable o inevitable (Mirone y Benedetti, 2001).

Más acepciones tiene el término espontaneidad. Para muchos, una reacción química solamente es espontánea si es observable (Ribeiro, Pereira y Maskill, 1990) o si sucede sin intervención externa, ya sea porque no necesitan un aporte de energía/calor o porque no tienen *energía de activación* (Ribeiro, Pereira y Maskill, 1990; Ross, 1993; Ochs 1996; Selepe y Bradley, 1997; Boo, 1998; Sözbilir, 2002, 2004a). Según estos alumnos que sostienen estas ideas, un proceso como la combustión del papel a temperatura ambiente no es espontáneo, porque para nuestra experiencia cotidiana los folios, periódicos, libros y demás objetos de papel no arden hasta que se les aplica una llama o se les aporta una cierta cantidad de energía/calor/temperatura/energía de activación.

En resumen, las acepciones alternativas más frecuentes de la espontaneidad le asocian los matices de movimiento rápido aleatorio, acción inmediata o rapidez (Selepe y Bradley, 1997) o acción no dirigida (Sözbilir, 2002, 2003). Estas concepciones se presentan también entre los universitarios. Por ejemplo, en el estudio de Ribeiro *et al.* (1990), sólo dos de los catorce entrevistados explicaron la espontaneidad de varios procesos químicos de acuerdo con las ideas científicas.

Dado que, para algunos estudiantes, la espontaneidad solamente se verifica en los procesos en los que no se interviene, entonces las reacciones químicas nunca son espontáneas (Ribeiro *et al*., 2000, Thomas y Schwenz, 1998).

Uno de los aspectos más difíciles del aprendizaje de la Química es comprender por qué se producen las reacciones. El criterio de espontaneidad más utilizado por los químicos es la variación de la energía de Gibbs, que corresponde a las condiciones de temperatura y presión constantes. Utilizando la ecuación fundamental de la Termodinámica se puede predecir qué reacciones suceden en unas condiciones dadas y qué condiciones necesita una reacción dada para producirse. Pero que un alumno llegue a aplicar esta ecuación no quiere decir que comprenda las bases teóricas mediante las cuales la Ciencia explica por qué y cómo son posibles los procesos. Como sucede en la predicción del sentido de las transferencias energéticas netas entre el sistema y el entorno, se observa que muchos estudiantes resuelven sin grandes dificultades las tareas cuantitativas sobre la espontaneidad de las reacciones químicas, sin manifestar la misma eficacia en las tareas cualitativas (Teichert y Stacy, 2002).

Para la mayoría del alumnado (más del 80%, según Boo y Watson, 2001), el motor del cambio químico es la acción de un agente causal externo sobre el sistema. Los resultados de las investigaciones en Didáctica de las Ciencias señalan dos claras tendencias en los que aprenden:

En primer lugar, muchos opinan que una reacción química no puede suceder sin una intervención activa externa como el calentamiento. La acción del calor, las llamas o el fuego como agente causal del cambio químico no sólo es muy común en los primeros cursos de Ciencias (Novick y Nussbaum, 1978; Barral y Fernández, 1992; Watson, Prieto y Dillon, 1997; Krnel, Watson y Glaser, 1998), sino también entre quienes ya han recibido instrucción sobre las transferencias de energía entre el sistema y el entorno y sobre magnitudes termodinámicas como la entalpía y la entropía (Boo, 1998; Teichert y Stacy, 2002). Según Boo (1998), las explicaciones de los estudiantes de Grado 12 (~16 años de edad) no se distancian mucho de las que aportan los alumnos de Grado 8 (~12 años de edad) estudiados por Novick y Nussbaum (1978); también apuntan en este sentido los resultados de Barral y Fernández (1992) sobre las ideas de adolescentes de 15-16 años de edad. En general, los alumnos continúan basando sus explicaciones en razonamientos de sentido común cuando se trata de explicar el cambio químico, pero, una vez que se inician

en el estudio de la Termodinámica, crece la proporción de los que modifican sus ideas hacia nuevas *driving forces* como la adición de energía al sistema (Thomas y Schwenz, 1998) o la absorción de energía/calor (Boo, 1998). Por ejemplo, según Boo y Watson (2001), son un 20% los que creen que la causa de las reacciones es el aporte de calor al sistema. El porcentaje de defensores de la *driving force* calorífica es significativamente menor en esta investigación que en otras precedentes, y es posible que el perfil de las reacciones estudiadas en este caso tenga mucho que ver: se pidió a los alumnos que interpretaran reacciones que sucedían a temperatura ambiente y sin previo calentamiento del sistema o aplicación de llama o chispa. Un 10% de la muestra apuntó que la causa de las reacciones está en el disolvente.

Sin embargo, cuando la pregunta que se les formula alude explícitamente al sentido en el que sucede la reacción, los estudiantes también pueden focalizar su atención en las características más reseñables de la ecuación química y responder que la reacción sucederá porque "todas [las sustancias] parecen [estar compuestas de] moléculas" o porque la ecuación/reacción está "ajustada" (Teichert y Stacy, 2002). Las ideas sobre la reactividad o fuerza/actividad de las sustancias implicadas también repercuten en las interpretaciones. Según Boo y Watson (2001), que revisaron los agentes causales preferidos por los alumnos en el contexto de la Termodinámica de las reacciones químicas, cerca de un tercio considera que el motor del cambio químico es la "reactividad" de los reactivos (o la "fuerza" si éstos son ácidos). Algunos puntualizan que la causa está no tanto en la reactividad como en la diferencia de reactividades, lo que produce un "desplazamiento" de sustancias favorecido por el reactivo más activo. En efecto, sustancias como el ácido clorhídrico tienden a considerarse reactivos, no productos de reacción (Teichert y Stacy, 2002). En esta percepción quizá influye también el hecho de que, durante los primeros cursos de Química, los estudiantes se acostumbran a leer las ecuaciones químicas "en el sentido de la flecha" (Kermen y Méheut, 2011), hasta que en determinado momento de su vida escolar se les informa de que los cambios químicos no son completos, y que es posible que en determinadas condiciones se produzca la reacción inversa a la que indica la ecuación química.

A continuación se discuten las ideas alternativas sobre la irreversibilidad:

Prácticamente un 90% de los estudiantes vincula la irreversibilidad de un proceso con los aspectos cinéticos del mismo (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a). La idea más aceptada relaciona la baja velocidad con la reversibilidad, y viceversa: la rapidez de un proceso químico es un criterio que indica su irreversibilidad, así que un proceso brusco es irreversible (Duprez, Méheut y Kermen, 2004; Duprez y Méheut, 2003). Por ejemplo, se tiende a considerar que hidrógeno y oxígeno reaccionan de manera reversible a temperatura ambiente porque la reacción es lenta en estas condiciones. El *quasi*-estatismo, relacionado con una baja velocidad del proceso y la aparente inmovilidad del sistema en el estado de equilibrio, es otro de los criterios utilizados por los alumnos de secundaria (Kermen,

2005), que utilizan los aspectos fenomenológicos como el aparente estatismo macroscópico para definir un proceso como irreversible (Kermen y Méheut, 2009).

También se han detectado asociaciones alternativas entre el concepto termodinámico de irreversibilidad y determinados constructos relacionados con el Equilibrio Químico (Thomas y Schwenz, 1998). Las ideas más extendidas son dos: dos tercios de los alumnos definen la irreversibilidad o reversibilidad del proceso en función del sentido del mismo (directo o inverso, respectivamente), mientras que otros asocian la reversibilidad con el regreso del sistema a su estado inicial una vez se ha alcanzado el equilibrio (Duprez, Méheut y Kermen, 2004; Duprez y Méheut, 2003). Recordemos que no pocos libros de texto de enseñanza secundaria recogen la definición de irreversibilidad como la imposibilidad de que un proceso cambie de sentido, y que en la enseñanza universitaria los textos prefieren una aproximación "cinemática" en detrimento del análisis de las causas de la irreversibilidad (Duprez, Méheut y Kermen, 2004). Así, ofrecen al alumnado un criterio alternativo para distinguir los procesos físicos de los químicos: si el proceso es irreversible y no se puede obtener de nuevo la composición del estado inicial, el proceso es químico, mientras que si se puede devolver el sistema al estado original, el proceso es físico (Roca, 2008).

También se han detectado relaciones alternativas entre la irreversibilidad de los procesos y la espontaneidad y la variación de la energía de Gibbs del sistema. Por ejemplo, algunos universitarios consideran que las reacciones irreversibles no son espontáneas, o que necesitan el aporte de una gran cantidad de energía para suceder. Por lo tanto, la variación de la energía de Gibbs asociada a las reacciones irreversibles es positiva (Sreenivasulu y Subramaniam, 2013).

De los resultados de la investigación se concluye que prácticamente ningún estudiante llega a construir un modelo sobre la redistribución de la energía a lo largo de un proceso termodinámico. Por lo general, las interpretaciones del alumnado sobre la irreversibilidad de los procesos reales no se basan en los constructos del dominio microscópico (Kesidou y Duit, 1993), y se observa que la instrucción apenas ayuda a los alumnos a progresar en sus conocimientos sobre la irreversibilidad y la espontaneidad (Kesidou y Duit, 1993; Thomas y Schwenz, 1998; Boo y Watson, 2001). Son pocos los que llegan a integrar estos conceptos en sus esquemas de conocimiento, aun dentro del dominio macroscópico de representación (Duit y Kesidou, 1988; Kesidou y Duit, 1993). Prueba de ello es que la mayoría reconoce que no recuerda en absoluto en qué consiste y para qué es útil el segundo principio de la Termodinámica (Thomas y Schwenz, 1998), y casi ningún estudiante aplica la variación de la entropía (del universo) o cualquier otro constructo relacionado con el segundo principio para analizar los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos; esta tendencia se observa incluso entre los universitarios (por ejemplo, Pintó Casulleras, 1991; Boo y Watson, 2001). Tan poco familiar llega a ser el segundo principio para el alumnado, que ni siquiera se

acuerdan de él a la hora de definirlo como uno de los enunciados más difíciles de aprender (Sözbilir, 2003), cuando la comunidad educativa no duda de que así es (Stilyanidou y Boohan, 1998; Mirone y Benedetti, 2001).

Hasta este punto se han desarrollado las ideas alternativas sobre la distribución de la energía en los sistemas materiales, la espontaneidad y la irreversibilidad. A continuación incluimos, en un último apartado sobre las concepciones del alumnado en el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos, los principales resultados de la investigación en Didáctica de las Ciencias sobre los criterios que utilizan los estudiantes para analizar en qué condiciones se producen las reacciones químicas y cuáles son sus aspectos termodinámicos.

Ideas alternativas sobre los criterios de espontaneidad en el estudio termodinámico de los procesos

Los alumnos manifiestan numerosas y variadas ideas alternativas cuando elaboran interpretaciones sobre los aspectos termodinámicos de los procesos químicos. Por lo general, utilizan criterios que no coinciden con los científicos (Kesidou y Duit, 1993); en otras ocasiones recurren a los criterios de la ciencia escolar, pero los extralimitan más allá de sus condiciones de aplicación o, por el contrario, los restringen inadecuadamente a ciertos procesos o circunstancias.

Las principales dificultades que se han detectado son comunes a muy diferentes culturas, poblaciones y edades, y tienen relación con algunos enfoques y *praxis* típicas de la enseñanza tradicional, con algunos errores conceptuales y terminológicos que aparecen en los libros de texto o que expresan repetidamente los profesores, y con la gran confianza que tienen los alumnos en el lenguaje cotidiano y en las formas de razonamiento de sentido común. Se observan dos grandes tendencias alternativas:

En primer lugar, muchos estudiantes tienden a proyectar sus experiencias cotidianas en la interpretación de los aspectos termodinámicos de los procesos químicos. Así, predominan las descripciones y explicaciones basadas en la percepción sensorial y otros aspectos del dominio macroscópico. Los razonamientos de fundamentación microscópica son esporádicos y fragmentarios, y en muchos casos los conocimientos nuevos no llegan a integrarse.

En segundo lugar, los alumnos parecen encontrarse más cómodos con la manipulación de entidades matemáticas sin significado (si ésta les permite obtener un resultado numérico) que con la elaboración de razonamientos interpretativos. Parece que la instrucción tradicional también refuerza la convicción de que la clave del éxito en la resolución de las cuestiones termodinámicas está en la memorización de las ecuaciones y enunciados de los principios termodinámicos.

Cuando los alumnos aplican ideas alternativas sobre las transferencias energéticas implicadas en las reacciones químicas (*Los procesos químicos*, pág. 141)

para analizar la dinámica de las reacciones, pueden elaborar algunos razonamientos alternativos que les ayudan a interpretar la espontaneidad de los procesos en función de la naturaleza del sistema y de las condiciones a las que éste está sometido. A continuación se resumen los criterios alejados de la ciencia escolar que se han detectado en el alumnado de la enseñanza secundaria y universitaria, y que pueden estar relacionados con los aspectos energéticos, cinéticos y de equilibrio de los procesos químicos (Johnstone *et al.*, 1977; Granville, 1985; Ribeiro *et al.*, 1990; Pintó Casulleras, 1991; Beall, 1994; Selepe y Bradley, 1997; Banerjee, 1995; Boo, 1998; Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 1999 Ribeiro, 1990; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2001, citado por Sözbilir, 2004a; Sözbilir, 2002; Teichert y Stacy, 2002; Sözbilir, 2003; Sözbilir, 2004a; Sözbilir, PýnarbaÞý y Nutaç, 2010; Bodzin, 2012; Sreenivasulu y Subramaniam, 2013). Antes de nada, debemos precisar que las ideas alternativas que aquí se revisan están presentes en alumnos que previamente recibieron instrucción escolar sobre Termoquímica y Termodinámica Química, así que ya tenían conocimiento institucional previo de las magnitudes y los principios termodinámicos.

- ***Criterios de espontaneidad relacionados con los aspectos energéticos***

En la literatura apenas se ha explorado hasta qué punto los alumnos construyen modelos microscópicos, adecuados o alternativos, que les permitan relacionar los mecanismos de transferencia energética con la espontaneidad de los procesos. Ni siquiera las investigaciones que determinan las ideas sobre la espontaneidad y la variación de la energía de Gibbs ponen de manifiesto si los estudiantes relacionan el trabajo útil, la degradación de la energía y el rendimiento de los procesos físicos y químicos. Solamente algunos estudios del ámbito de las Ciencias Naturales aluden a las carencias en la comprensión de la eficiencia energética. Por ejemplo, para la mayoría de los alumnos de secundaria, no existen pérdidas de energía por calor en el transporte de la energía desde las centrales energéticas hasta los puntos de consumo mediante la red eléctrica (Bodzin, 2012).

Sin entrar en disquisiciones microscópicas, los estudiantes tienden a tomar como criterios para predecir la espontaneidad de una reacción el *calor de reacción* o la variación de entalpía (Selepe y Bradley, 1997; Teichert y Stacy, 2002; Sözbilir, 2002, 2003, 2004a). Son pocos los que utilizan la variación de entropía como criterio de espontaneidad (Pintó Casulleras, 1991; Boo, 1998), y casi ninguno elabora una explicación plausible sobre los factores que hacen que un proceso sea favorable en unas condiciones dadas.

La idea alternativa más extendida es la que relaciona la exotermia de un proceso con la espontaneidad (Johnstone *et al.*, 1977). No olvidemos que esta idea fue en su día parte del conocimiento científico, y que grandes investigadores como Berthelot o Thomsen defendieron, a finales del siglo XIX, que el motor de los procesos químicos era la minimización de la cantidad de energía del sistema. No

resulta extraño, pues, que algunos alumnos lleguen a conclusiones similares (Carson y Watson, 1999); pero establecen una conexión entre exotermia y espontaneidad diferente de la que los científicos desarrollaron en el pasado. Podemos encontrar tres variantes de la misma idea alternativa:

La primera variante es la más simple: si una reacción es espontánea (en el sentido de que tiene lugar sin intervención externa), esto se debe a que no necesita de la aplicación de energía/calor para suceder naturalmente, sin más; y ésta es una de las definiciones alternativas de exotermia. Según este razonamiento, las reacciones espontáneas son necesariamente exotérmicas.

La segunda variante requiere, en el desarrollo del razonamiento, un intermediario conceptual cinético: las reacciones químicas son espontáneas cuando los productos tienen menor entalpía que los reactivos (es decir, $\Delta H < 0$), porque las reacciones exotérmicas suceden con mayor velocidad (Sözbilir, 2001, citado por Sözbilir, 2004a), y las reacciones son espontáneas cuando son rápidas. Si se conectan estas dos ideas alternativas, las reacciones químicas espontáneas (esto es, rápidas) son necesariamente las exotérmicas.

La tercera variante, cuyo mecanismo no necesita de intermediarios cinéticos, relaciona la idea de que las reacciones químicas son espontáneas si implican una transferencia de energía/calor al entorno, con una concepción de la absorción de energía/calor como el motor del cambio químico (Selepe y Bradley, 1997). Así, si el sistema ya tiene suficiente energía/calor para suceder, este motor inicia la reacción y cede parte de la energía/calor al medio circundante. Al preguntar de nuevo a los estudiantes si creen que una reacción es espontánea solamente cuando es exotérmica, algunos manifiestan sus dudas al respecto, y puntualizan que la variación de entalpía es uno de los factores a tener en cuenta en el análisis de la espontaneidad (Sözbilir, 2002). Sin embargo, no suelen relacionarla con el balance global de energía entre el sistema y el entorno.

Aproximadamente un sexto de los alumnos de secundaria afirma que las reacciones endotérmicas no pueden ser espontáneas (Johnstone *et al.*, 1977; Sözbilir, 2004a). Estos razonamientos son aplicables también a procesos físicos como los cambios de estado de agregación, en los cuales los fenómenos térmicos son claramente perceptibles. Aquellos procesos químicos que presentan reactivos y productos en distintos estados de agregación suelen incentivar en el alumnado la necesidad de activar relaciones sobre las transferencias de energía por calor (que en general se asocian con la variación de temperatura del sistema), o analogías entre este tipo de reacciones químicas y los cambios de estado de agregación.

La persistencia de estas ideas se observa en el estudio de Carson y Watson (1999), en el cual se describe un reajuste del modelo alternativo: después de que el profesor hiciera explícita la relación entre la espontaneidad de un proceso y el incremento de entropía del universo, algunos alumnos pasaron a vincular el

incremento entrópico con una disminución de la entalpía del sistema y, como resultado, se reafirmaron en la idea de que las reacciones químicas son espontáneas si la variación de la entalpía del sistema es negativa.

Quienes sostienen la relación alternativa entre espontaneidad y exotermia no son capaces de construir un razonamiento que explique cómo se producen espontáneamente algunas reacciones químicas que son claramente endotérmicas (Johnstone *et al.*, 1977; Carson y Watson, 1999).

- ***Criterios de espontaneidad relacionados con los aspectos cinéticos***

También se ha descrito una tendencia a recurrir a la Cinética Química para justificar la espontaneidad de las reacciones químicas en términos de la energía de activación o aplicando la teoría de colisiones (ver, por ejemplo: Thomas y Schwenz, 1998). Las dos principales ideas alternativas a este respecto son:

- Las reacciones espontáneas son aquéllas que no requieren energía de activación (Selepe y Bradley, 1997).

- Las reacciones espontáneas son las ocurren rápidamente (Selepe y Bradley, 1997), mientras que las no espontáneas tienen una baja velocidad de reacción (Sözbilir, 2002). Esta idea parece una consecuencia directa del significado cotidiano de la palabra espontaneidad como inmediatez o rapidez. En la investigación de Sözbilir (2002) se observa cómo los alumnos afirman que una reacción tiene lugar en unas condiciones dadas si el signo de la variación de la energía de Gibbs es negativo, pero cuando se les pide que definan cuándo una reacción *es espontánea*, responden que esto solamente sucede si la velocidad de reacción es elevada. En este caso, el significado de la palabra espontaneidad está totalmente desligado del hecho de que la reacción química tenga o no lugar.

- ***Criterios de espontaneidad relacionados con los aspectos de equilibrio***

La variación de la energía de Gibbs cuantifica la cantidad de energía de la que dispone el sistema a temperatura y presión constantes para continuar los intercambios microscópicos que conducen la reacción en uno u otro sentido. Así pues, el valor de ΔG del sistema es un criterio de espontaneidad que relaciona los balances energéticos sistema-entorno con el estado de equilibrio que se alcanzaría en las condiciones de reacción.

Las ideas alternativas sobre la energía de Gibbs son variadas y persistentes, y después de la instrucción incluso puede detectarse una mayor variedad de ellas (Sözbilir, 2002). Los universitarios también tienen dificultades para utilizar ΔG como criterio de espontaneidad de las reacciones químicas, sobre todo en los contextos cotidianos (Ribeiro *et al.*, 1990; Pintó Casulleras, 1991; Banerjee, 1995; Selepe y Bradley, 1997; Thomas y Schwenz, 1998; Carsony Watson, 2000). Sin embargo, existen pocos estudios sistemáticos al respecto (Sözbilir, 2003), y todavía menos

sobre los niveles preuniversitarios de enseñanza (Johnstone *et al.*, 1977). Es muy común que, después de haber estudiado Termodinámica Química, al comienzo del curso siguiente la mayoría solamente recuerde una información sobre ΔG: que su valor tiene que ser negativo para que la reacción química propuesta sea espontánea y/o suceda. Así pues, para la mayor parte de los estudiantes, la energía de Gibbs se reduce a un valor cuya variación tiene que ser negativa para que una reacción sea posible (Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002), y muy pocos son capaces de explicar por qué utilizan este criterio de espontaneidad (Ribeiro *et al.*, 1990).

Las ideas alternativas más extendidas son las que encajan la energía de Gibbs dentro del marco de las *formas de energía*, en el cual el significado de *G* se desdibuja y pasa a identificarse con el de otras *formas*, como la energía interna y, sobre todo, la entalpía y la entropía (Ribeiro *et al.*, 1990; Selepe y Bradley, 1997; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002).

Al preguntar a los estudiantes cuál es el significado de la variación de la energía de Gibbs, entre la cuarta parte (Thomas y Schwenz, 1998) y la mitad (Selepe y Bradley, 1997) manifiesta que ΔG es la energía (térmica) ganada o perdida por el sistema, la energía no utilizada en la reacción (Selepe y Bradley, 1997) o la energía *interna* (del sistema) que hace que las sustancias reaccionen Thomas y Schwenz (1998). Una concepción minoritaria define ΔG como la máxima cantidad de trabajo realizado (Sözbilir, 2002), aunque casi ningún alumno clarifica qué significa o por qué está determinada la máxima cantidad de trabajo. Por influencia de la antigua denominación de *energía libre*, algunos consideran que la energía de Gibbs es la energía que tienen las sustancias cuando están libres (Sözbilir, 2002).

Otras ideas descritas en la literatura son similares a las que ya hemos comentado para las demás magnitudes termodinámicas, como la confusión entre la variable (G) y su variación ΔG (Beall, 1994; Banerjee, 1995). Los alumnos no suelen ser conscientes del significado del superíndice ^{o} que se añade a las magnitudes termodinámicas (por ejemplo, a la energía de Gibbs) para indicar que los valores numéricos están referidos a la presión normal o estándar (Beall, 1994, Thomas y Schwenz, 1998). Entre los universitarios, solamente un 1% hace explícita esta puntualización (Beall, 1994).

En general, no reconocen las condiciones de aplicabilidad de la función de Gibbs (Granville, 1985, Beall, 1994), y después de realizar experiencias de laboratorio a veces pasan a restringir la validez de la ecuación fundamental de la Termodinámica a un cierto tipo de reacciones, en especial aquéllas con las que han trabajado (Beall, 1994).

En lo que se refiere al perfil de la variación de la energía de Gibbs a lo largo de un proceso, tres investigaciones (Banerjee, 1995; Thomas y Schwenz, 1998; Sözbilir, 2002) han puesto de manifiesto que los estudiantes se enfrentan a grandes dificultades para interpretar y elaborar gráficas que pongan de manifiesto, en

función del avance o extensión de la reacción química, los cambios que experimenta la *G* del sistema; aunque hay que tener en cuenta que tiene el mismo grado de dificultad interpretar una gráfica que realizar la representación (García y Perales, 2007). En el estudio de Banerjee (1995), los alumnos de la muestra eran universitarios, y se les pedía que señalaran, de entre varias gráficas posibles, cuál era la correspondiente a un proceso espontáneo. Algunos explicaban que la energía de Gibbs crece o decrece linealmente para hacer la reacción espontánea en una u otra dirección, dependiendo de si son los reactivos o los productos los que tienen una mayor cantidad de energía de Gibbs. Un pequeño porcentaje de la muestra respondió que *G* alcanza el valor cero o se aproxima asintóticamente al cero en el estado de equilibrio. Según Thomas y Schwenz (1998), casi la mitad de los estudiantes universitarios entrevistados sostiene esta idea. La alusión al valor cero podría deberse a una visión alternativa del valor mínimo que alcanza la energía de Gibbs en el estado de equilibrio ("el mínimo siempre es el cero"), o a una confusión entre la variable *G* y su variación ΔG: en el equilibrio, la energía de Gibbs se hace mínima y, si el sistema permanece en ese estado, $\Delta G = 0$. En un grupo de estudiantes que habían recibido instrucción escolar sobre Termodinámica Química, Sözbilir (2002) ensayó una propuesta de enseñanza sobre los criterios de espontaneidad de reacción, y observó que del pre-*test* al post-*test* se producía un aumento significativo (de un 7%) en la proporción de los que seleccionaban una gráfica inadecuada para representar *G* frente al avance de la reacción.

Parece que la instrucción tarda en introducir mejoras significativas en las ideas de los alumnos, porque éstos se aferran a la manipulación algorítmica de los valores que se relacionan en la ecuación fundamental de la Termodinámica. La ecuación no tiene un significado físico para ellos, sólo sirve para realizar cálculos y obtener un resultado numérico (Carson y Watson, 2002). Como al mismo tiempo los estudiantes se resisten a desarrollar un aprendizaje significativo de los balances energéticos de los procesos químicos, prefieren seguir utilizando interpretaciones de sentido común, más sencillas. Cuando se les pide que predigan la espontaneidad de un proceso sin facilitárseles expresamente valores numéricos (Thomas y Schwenz, 1998), el 25% utiliza la ecuación fundamental de la Termodinámica.

En la literatura también se recogen algunas ideas alternativas mediante las cuales se establece un puente conceptual entre la Termodinámica Química, el Equilibrio Químico y la Cinética Química. Lo más frecuente es que los alumnos lleguen a conectar la variación de la energía de Gibbs con la extensión del proceso, utilizando la velocidad de reacción como estimador. Pero en otros casos utilizan la cinética del proceso para estimar cuál será el valor de la energía de Gibbs (perfil termodinámico) a través de la noción de equilibrio ("el valor de ΔG en el equilibrio es cero/mínimo"). Las ideas más frecuentes en este ámbito son:

- La variación de la energía de Gibbs es alta cuando la velocidad de la reacción química también es elevada (Johnstone *et al.*, 1977; Sözbilir, 2002).

La creencia de que ΔG es un criterio válido para estimar los aspectos cinéticos de un proceso químico está muy arraigada, porque permite explicar bastantes fenómenos de la vida cotidiana (por ejemplo, los cambios de estado de agregación) desde una perspectiva meramente macroscópica.

La cuarta parte de los alumnos de secundaria afirma que las reacciones rápidas tienen mayor valor de ΔG que las reacciones lentas. Según Johnstone *et al.* (1977), algunos estudiantes consideran que si la velocidad neta del proceso tiende a cero cuando el sistema se aproxima al estado de equilibrio, es porque ΔG tiende a cero. Por lo general se identifica la estabilidad termodinámica con muy bajas o nulas velocidades de reacción, y viceversa: el responsable de que un proceso químico sea rápido es el elevado valor de ΔG (Thomas y Schwenz, 1998; Ribeiro, *et al.*, 2000; Carson y Watson, 2002). Según Sözbilir (2002), esta idea alternativa surge de una analogía con el mundo macrofísico: cuanta mayor energía potencial tienen los objetos, más rápido caen, y cuanta más energía se les aporta, mayor es la velocidad que alcanzan. Siguiendo este razonamiento, una mayor variación (relativa) en la energía de Gibbs se convierte en un indicador de una mayor velocidad de reacción. Supongamos tres procesos químicos, a los que llamaremos con las letras *A*, *B* y *C*. Si se propone a los alumnos que comparen las características de estos procesos, teniendo en cuenta que $\Delta G_A > 0$, ΔG_B = -40 kJ/mol y ΔG_C = -20 kJ/mol (Sözbilir, 2002), los alumnos que asocian una gran ΔG con una velocidad elevada ordenan las velocidades de los procesos *A*, *B* y *C* en el siguiente sentido: $v_A > v_C > v_B$. Después de la instrucción, se observó un aumento en el porcentaje de alumnos que manifestaban esta concepción alejada de la ciencia escolar. En un estudio posterior (Sözbilir, PýnarbaÞý y Nutaç, 2010), se recoge la tendencia a atribuir una mayor velocidad de reacción a los procesos químicos con un valor de ΔG más negativo.

Algunos alumnos creen que la relación entre la velocidad de la reacción y ΔG debe expresarse necesariamente en términos de ΔG^0 (Sözbilir, 2002).

- Cuanto más lenta es una reacción, menor es la variación de la energía de Gibbs asociada al proceso.

Esta vinculación entre el valor de ΔG y la velocidad de reacción presenta una relación de dependencia en sentido contrario a la de la idea anterior: aquí la velocidad del proceso se utiliza como estimadora para predecir cómo es la variación de energía de Gibbs asociada. Esta idea no es muy común entre el alumnado, aunque parece robustecerse con la instrucción, según (Sözbilir, 2002): un 6% de alumnos la defendían en el pre-*test*, y un 13% en el post-*test*.

- Cuanto menor es la variación de la energía de Gibbs, más rápido sucede la reacción química.

Si a los alumnos no les convence la relación directa entre ΔG y la velocidad de reacción, pueden apelar a la relación inversa en la interpretación de aquellos

procesos que así lo requieran. Si los profesores introducen la relación teórica entre el valor de ΔG y la situación de equilibrio, puede que crezca el número de partidarios de esta idea. Por ejemplo, en la investigación de (Sözbilir, 2002), realizada sobre una muestra de alumnos universitarios, la aceptación subió de un 5% a un 34% entre el pre-*test* y el post-*test*.

Al margen de las ideas que se han comentado hasta ahora, parece que el análisis detallado del sentido de los intercambios energéticos entre el sistema y el entorno sobre la base de la ecuación fundamental de la Termodinámica puede introducir más confusión en el alumnado. Suelen presentarse dificultades para analizar en qué sentido favorecen la espontaneidad de reacción las transferencias de energía. Parece que las reglas que analizan la espontaneidad en función de los signos "favorables" o "desfavorables" de ΔH y ΔS no ayudan a los estudiantes a relacionar los significados de los principios primero y segundo de la Termodinámica.

El signo negativo que encabeza el término $T \cdot \Delta S$ también introduce dificultades a la hora de interpretar los balances energéticos (por ejemplo, Sözbilir *et al.*, 2010). Además, se observa que a veces los alumnos tienden a basar sus respuestas en un solo factor, la temperatura, sin detenerse a estudiar los aspectos energéticos del proceso (Teichert y Stacy, 2002). La creencia de que ΔG depende solamente de la temperatura puede que sea la idea subyacente en la afirmación alternativa de que G no varía durante los cambios de estado de agregación, porque la temperatura no varía (Sreenivasulu y Subramaniam, 2013).

Con la implementación de propuestas de enseñanza no es difícil que aumente el porcentaje de alumnos que relacionen la espontaneidad de los procesos con el signo negativo de ΔG, y la situación de equilibrio con el valor cero. La mayoría de los estudiantes llega a manipular la ecuación fundamental de la Termodinámica para predecir la espontaneidad de las reacciones químicas. Si no se pregunta explícitamente por los aspectos conceptuales de la ecuación, el número de concepciones alternativas que se detecta es pequeño, porque los alumnos se limitan a trabajar sólo con números. Cuando se les pide una interpretación sobre la dinámica del proceso, las respuestas alternativas se agrupan en dos tendencias:

En primer lugar, encontramos el razonamiento de que las reacciones con mayor valor de ΔG suceden en mayor extensión porque su velocidad es mayor, y un proceso rápido tiende a suceder completamente (Sözbilir, 2002).

En otros casos, los estudiantes tienden a hacer valer la estructura alternativa de las *formas de energía* y a ceñirse al dominio macroscópico para interpretar el proceso (Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002). Además, entre la conceptualización de G como una *forma* más de energía y la memorización del criterio de espontaneidad $\Delta G < 0$ se puede establecer una sinergia que refuerza la estructura alternativa de las *formas de energía* (Banerjee, 1995).

El estudio de Sözbilir *et al.* (2010) recoge algunas ideas alternativas más que relacionan los aspectos cinéticos, termodinámicos y de equilibrio; pero no las trataremos aquí, porque son variantes de las ya comentadas.

Hasta aquí, se ha presentado la revisión de las concepciones alternativas de los alumnos respecto a la Termoquímica y la Termodinámica Química. En el apartado siguiente, último del estado de la cuestión, se detallan las principales propuestas y materiales de enseñanza que se han publicado hasta la fecha para ayudar a los estudiantes a hacer evolucionar sus ideas hacia las de la ciencia escolar.

I.3.5.3. Propuestas y materiales de enseñanza en Termoquímica y Termodinámica Química

Comparado con el número de trabajos sobre las ideas alternativas y las dificultades de aprendizaje, es pequeño el número de publicaciones que presentan nuevas propuestas de enseñanza, recomendaciones y estrategias didácticas útiles para mejorar el aprendizaje de la Termoquímica y la Termodinámica Química.

En este apartado se detallan las propuestas de enseñanza más destacadas que se han publicado hasta 2014. Se incluyen tanto los enfoques, aproximaciones y recomendaciones didácticas que emanan de la investigación en el área para presentar los contenidos que son objeto de aprendizaje (*Enfoques y metodologías en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 198), como las unidades didácticas y los materiales que se han elaborado en las distintas investigaciones (*Propuestas didácticas y materiales de aprendizaje publicados en el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos*, pág. 232). Se indican algunos de los principales resultados y conclusiones de la implementación de aquellas propuestas que se han llevado al aula de Ciencias.

Enfoques y metodologías en la enseñanza de la Termodinámica

Los resultados de la investigación en Didáctica de las Ciencias sugieren que las dificultades de aprendizaje de la Termodinámica persisten después de años de instrucción, y los investigadores están de acuerdo en la necesidad de poner a disposición del profesorado nuevas propuestas y materiales de enseñanza que ayuden a los alumnos a hacer evolucionar sus ideas hacia las de la ciencia escolar (Salinas, Cudmani y Pesa, 1996; Selepe y Bradley, 1997; Barlet y Mastrot, 2000; Odetti, Falicoff, Contini y Humpola, 2001; Liu, Ebenezer y Fraser, 2002; Guisasola, Gras-Martí, Martínez Torregrosa, Alumdí y Becerra, 2004; Covaleda, Moreira y Caballero, 2005; Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006). Sin embargo, hay pocos estudios dedicados al diseño, elaboración y evaluación de propuestas didácticas sobre Termoquímica y Termodinámica Química, y en general sobre la Termodinámica de los procesos naturales, ya sea en el ámbito de la Física, la Química o la Biología. Además, en las aulas siguen patentes bastantes influencias de la enseñanza tradicional, tanto en España (por ejemplo: Solbes y Traver, 1996; Solbes

y Tarín, 1998, 2004; Doménech, 2003; Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006; Doménech *et al.*, 2013) como en otros países (por ejemplo: Teichert y Stacy, 2002; Bindel, 2004; Holman y Pilling, 2004; Sözbilir y Bennett, 2007).

En esta tesitura, los investigadores consideran que más allá de la publicación de propuestas didácticas novedosas, es necesaria una revisión sustancial de las estrategias y los materiales de enseñanza en todos los niveles (Doménech *et al.*, 2007), para evitar efectos tan indeseados como que la instrucción favorezca la aparición de nuevas ideas alternativas (por ejemplo, Sözbilir y Bennett, 2007) o refuerce la utilización de las formas de razonamiento cotidiano y el desarrollo de destrezas de bajo nivel en la resolución de problemas de base científica (Barlet y Mastrot, 2000).

La pervivencia de la enseñanza tradicional, que no sale al paso de las dificultades de aprendizaje, se refleja en algunas visiones de la Ciencia que mantienen los libros de texto y parte de los docentes en ejercicio, así como en las metodologías de aula y las aproximaciones didácticas a los contenidos (Doménech *et al.*, 2013). Además, por lo general el lenguaje de los libros de texto y el profesorado todavía no ha convergido lo suficiente con las ideas científicas actuales (por ejemplo, Ribeiro, 1992; Beall, 1994; Banerjee, 1995; Sözbilir y Bennett, 2007). En el siguiente apartado se resumen aquellos aspectos que, según los investigadores, generan enfoques de enseñanza que resultan inadecuados si se pretende ayudar a los alumnos a construir un conocimiento significativo y funcional de la Termodinámica. Después (*Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 202) se comentan los principales rasgos de las propuestas metodológicas diseñadas por investigadores.

Algunas visiones deformadas de la Ciencia y de la enseñanza de las Ciencias que se reflejan en la enseñanza de la Termodinámica

En general, la enseñanza convencional no favorece en los estudiantes una construcción de los conocimientos científicos que permiten interpretar las transformaciones de los sistemas materiales. Tiende a enfatizar exclusivamente en un operativismo conceptual poco significativo, y con frecuencia ignora las dimensiones epistemológica, metodológica y axiológica del aprendizaje que se aconsejan desde la investigación en Didáctica de las Ciencias. En las propuestas de enseñanza convencionales predominan los ejercicios mecánicos centrados en la manipulación matemática de datos de variación de entalpía (Barker y Millar, 1996; Barlet y Mastrot, 2000; Carson y Watson, 2002), entropía (Teichert y Stacy, 2002) y energía de Gibbs (Ross, 1988; Pintó Casulleras, 1991; Banerjee, 1995; Sözbilir, 2002; Teichert y Stacy, 2002). Así, los alumnos no necesitan manifestar sus ideas científicas para resolver los ejercicios que figuran en los libros (Gabel y Bunce, 1994). Al mismo tiempo, escasean los problemas situados en contextos que permitan incrementar el interés del alumnado (Solbes y Vilches, 1989, 1997) y hay muy pocas cuestiones

basadas en situaciones problemáticas de interés personal y social (Doménech, 2000; Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006). Estas deficiencias didácticas están relacionadas no sólo con el elevado fracaso escolar en Termodinámica (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006) sino con un descenso drástico del interés de los jóvenes por la Ciencia en general (Matthews, 1994; Solbes y Vilches, 1997).

La enseñanza tradicional de la Termoquímica y la Termodinámica Química no tiene en cuenta la historia de la Ciencia (Solbes y Traver, 1996) ni los resultados de la investigación didáctica sobre los nuevos modelos de aprendizaje de orientación constructivista (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2005, 2006). Como resultado de la instrucción tradicional, muchos profesores mantienen visiones inadecuadas sobre la Ciencia y los productos y procesos científicos, y pueden comunicarlas consciente o inconscientemente a los estudiantes a través de la enseñanza (Duschl 1995; Fernández *et al*., 2002). Las concepciones deformadas o deficientes sobre la filosofía y la Didáctica de la Ciencia que se mantienen en el profesorado tienen una repercusión directa sobre el alumnado (Mellado y Carracedo, 1993; Fenández *et al.*, 2002). Entre estas visiones inadecuadas destacan las siguientes (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006):

En primer lugar, se observa una perspectiva ahistórica y aproblemática en la introducción de los conceptos y teorías científicas, que tiende a soslayar la finalidad principal de la Ciencia: solucionar problemas. La visión ahistórica y aproblemática no pone de manifiesto que los conceptos y teorías cambian, evolucionan o pueden abandonarse si dejan de ser útiles para las finalidades con las que se emitieron en su día (Solbes y Traver, 1996). En Termodinámica hay varios casos destacados de evolución conceptual: la temperatura, el calor y, sobre todo, la energía (Solbes y Tarín, 1998, 2004; Doménech, 2003). Tanto los conceptos científicos como las relaciones que se establecen entre ellos son constructos humanos encaminados a interpretar la realidad; como tales, son provisionales y transitorios, susceptibles de ser modificados o sustituidos por otros que cumplan mejor su función. Por ejemplo, actualmente disponemos de las nociones de energía interna, entalpía, entropía y energía de Gibbs (y la de Helmholz), mediante las cuales podemos analizar detenidamente la capacidad de cambio de los sistemas en función de la cantidad de energía que se transfiere con el entorno de manera útil y la cantidad de energía no aprovechable que se dispersa en el entorno. Con esta información, es posible que en un futuro próximo la capacidad de cambio de los sistemas deje de representarse mediante la energía, en favor de la energía de Gibbs. Así pues, la definición de la energía se modificaría una vez más (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006). Desde el punto de vista de las estrategias didácticas, puede resultar muy interesante desarrollar en el aula una dinámica de debate sobre las distintas teorías rivales que concurren en una etapa histórica y bajo unos presupuestos filosóficos concretos (Pessoa y Castro, 1992; Solbes y Traver, 1996; Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2007). La introducción de la perspectiva histórica puede contribuir a mejorar

significativamente la enseñanza de la Termodinámica (Solbes y Tarín, 2004; Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2007) y ayudar a los estudiantes a comprender mejor los fenómenos térmicos y los aspectos energéticos de los procesos (Pintó Casulleras, 1991). Además, el conocimiento de la historia de la Termodinámica aporta a los profesores herramientas muy útiles para combatir las visiones distorsionadas de la Ciencia y sobre la Ciencia que perviven entre ellos (Solbes y Traver, 1996), para refinar sus estrategias de enseñanza y para ayudar al alumnado a construir una concepción actualizada de la Ciencia (Lopes, 2009), además de fomentar una actitud más positiva hacia la Ciencia y su aprendizaje.

En segundo lugar, encontramos una visión socialmente descontextualizada de la Ciencia que desliga ésta y su *praxis* del entorno social al que responde y cuyos problemas pretende resolver. Ya hemos indicado que este tipo de visiones no es deseable en la enseñanza porque silencia la dimensión social de la Ciencia (Giere, 1999) y dificulta la construcción de una imagen actualizada de la misma como medio de producción y divulgación de conocimiento. Las críticas a esta visión inadecuada han crecido en gran medida como resultado del movimiento de investigación sobre las interacciones CTSA (Solbes y Vilches, 1997), que enfatiza en la necesidad de llevar al aula una educación científica de mayor carácter social, mediante la cual se ayude al alumnado a entender los retos actuales a los que se enfrentan las sociedades humanas. A la vez, el enfoque CTSA sirve como medio para despertar entre los jóvenes el interés y la motivación hacia las Ciencias y su aprendizaje. La Termodinámica es precisamente un campo en el que se encuentran fácilmente multitud de situaciones problemáticas que ponen de manifiesto las distintas perspectivas de la Ciencia a lo largo de la historia, así como numerosas cuestiones actuales de interés personal y social (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2005, 2006). Éstas van desde la necesidad de mejorar el rendimiento energético y medioambiental de las máquinas térmicas hasta comprender los problemas derivados del actual uso de algunas de ellas, como los vehículos a motor y las centrales térmicas (incremento del efecto invernadero, lluvia ácida, *smog*, etc.), pasando por la toma de decisiones sobre los métodos y condiciones más convenientes para realizar determinados procesos industriales.

En tercer lugar, está la visión empirista y ateórica de la Ciencia, que ya se ha comentado en el apartado correspondiente a la revisión de la literatura (*Ciencia formal y ciencia escolar: la transposición didáctica*, pág. 25) y es quizá la concepción más criticada por los epistemólogos (Gil y Martínez Torregrosa, 1999). En Termodinámica, esta visión inadecuada se refleja en que muchos profesores prefieren recurrir a los aspectos procedimentales y/o mecánicos y obviar los contenidos conceptuales. Esto se traduce en una omisión de las definiciones relacionales de las variables termodinámicas principales, que se sustituyen por definiciones procedimentales, de menor nivel cognitivo. Existen riesgos de reforzar con ello algunas ideas alternativas. Por ejemplo, si los docentes introducen

operativamente la variación de entalpía de un proceso como el calor de reacción a presión constante (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006), evitan la construcción del significado de *H*; pero esta definición puede promover la identificación de *H* o de ΔH con el calor. El ejemplo más conocido de definición procedimental es el de la entropía, que se suele presentar en su versión macroscópica, en un intento por recrear la trayectoria cronológica de la Termodinámica: entropía es la cantidad de energía que se intercambia por calor en un proceso reversible que tiene lugar a temperatura constante.

Por último, destaca la visión que Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, (2007) denominan excesivamente formalista, y que está centrada en los aspectos meramente operativos de los contenidos. En el apartado *El tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas* (pág. 133) ya hemos indicado varios ejemplos de operativismo que se han detectado en la enseñanza de la Termodinámica, como son la introducción de la variación de entalpía mediante la ecuación $\Delta H = \Delta U - P \cdot \Delta V$ sin relacionarla con los aspectos energéticos del proceso, o la definición algorítmica de la energía de Gibbs, que en prácticamente todos los libros de texto figura como $G = H - T \cdot S$. A partir de esta ecuación se presenta la variación de la energía de Gibbs, mediante la ecuación fundamental de la Termodinámica. Ésta es la ecuación más útil para predecir la espontaneidad de los procesos que tienen lugar a temperatura y presión constantes, pero su aplicación irreflexiva no ayuda a analizar los aspectos dinámicos del proceso, ni a construir el significado de ΔG como indicador de la cantidad de energía útil con la que cuenta el sistema para continuar evolucionando.

La aplicación mecánica de algoritmos, que por lo general oculta dificultades en la comprensión conceptual y en el desarrollo de destrezas y estrategias para resolver problemas, sigue siendo una constante en la enseñanza de la Física y la Química (Furió-Gómez, Solbes y Furió, 2007) y hace más difícil que los estudiantes perciban la importancia y la necesidad de desarrollar un aprendizaje significativo y útil en lo conceptual y lo procedimental (Barlet y Mastrot, 2000).

Otras visiones de la Ciencia y de la actividad científica (visión acumulativa y lineal, individualista, elitista, "de sentido común"…) afectan también a la enseñanza de la Termodinámica, no tanto de manera particular sino en la medida en la que afectan a toda la Ciencia en general (Gil y Martínez Torregrosa, 1999).

Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica

Las concepciones inadecuadas de la Ciencia (*Revisión de las principales perspectivas sobre la naturaleza y epistemología de la Ciencia*, pág. 15) y de los procesos de enseñanza y aprendizaje (*Algunas visiones deformadas de la Ciencia y de la enseñanza de las Ciencias que se reflejan en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 199) se traducen en la aplicación de metodologías didácticas que tienden a obviar las componentes social y contextual del aprendizaje y dificultan las interacciones discursivas de

razonamiento y argumentación que intervienen de manera decisiva en el establecimiento de afirmaciones sobre el conocimiento en Ciencias. En consonancia con las metodologías tradicionales, las estrategias mayoritarias de evaluación del aprendizaje en las aulas no responden a las finalidades de la ciencia escolar que hemos enunciado (*Figura 4*, pág. 26), y el estilo de las preguntas de examen en las que se basa la evaluación/calificación tiene un perfil algorítmico que no exige poner en juego más que destrezas básicas en la manipulación de datos matemáticos.

Estos enfoques tradicionales de evaluación fomentan la concepción dogmática de los conocimientos científicos y su memorización irreflexiva, junto con la utilización sistemática de los mecanismos de fijación y reducción funcionales (Furió y Calatayud, 2000; Furió, Calatayud, Bárcenas y Padilla, 2000). A menos que los profesores demuestren que otorgan importancia a la comprensión conceptual y a la utilización de las destrezas de razonamiento y argumentación para responder a cuestiones de base científica, los alumnos difícilmente sentirán la necesidad de ir más allá de la manipulación de ecuaciones algebraicas para despejar una incógnita cuyo valor numérico es la respuesta a cualquier pregunta (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006). Los enfoques de evaluación centrados en la calificación de un examen final compuesto por ejercicios numéricos se suelen traducir en un profundo convencimiento de que para saber Termodinámica basta con memorizar ecuaciones sin significado y operar con ellas (Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 1999; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002; Sözbilir, 2004a; Sözbilir y Bennett, 2007).

Además, en las propuestas y metodologías tradicionales se tiende a obviar los conocimientos iniciales de los alumnos. Por ejemplo, en España, entre los profesores en activo no llega al 20% la proporción de los que creen conveniente considerar las ideas previas a la hora de diseñar materiales y estrategias para introducir el concepto de energía (Solbes y Tarín, 1998). Tampoco se comprueba si los estudiantes dominan los prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica (Ben-Zvi *et al.*, 1993) ni si ponen en juego con soltura las destrezas y estrategias necesarias para construir los nuevos conocimientos. Se da por supuesto que ya han trabajado los conceptos, destrezas y estrategias básicas en cursos anteriores y que, si no es así, de todos modos las asimilarán sobre la marcha sin necesidad de trabajarlas explícitamente en el aula (Arons, 1999).

Como hemos indicado ya, los libros de texto son el material de enseñanza preferido por los profesores (*Materiales de aprendizaje*, pág. 84). Por este motivo es conveniente analizar con detalle qué visiones y contenidos de Termodinámica recomiendan desarrollar en las aulas. A este respecto, la literatura de investigación en el ámbito de la Física y Química tiene una trayectoria de varias décadas (Zemansky, 1970; Bauman, 1992a,b; Michinel y D'Alessandro, 1994; Leite, 1999; Romer, 2001; Cotignola *et al.*, 2002; Furió Gómez, Solbes y Furió, 2006; Quílez, 2009; Doige y Day, 2012).

Muchos de los libros de texto en los que los profesores apoyan su práctica de enseñanza contienen las visiones inadecuadas de la Ciencia que acabamos de comentar, además de errores conceptuales (Furió, Solbes y Furió, 2005) y un énfasis excesivo en la utilización de las ecuaciones matemáticas en detrimento de la comprensión conceptual (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, (2007)); algunos autores de textos escolares parecen considerar que la comprensión se oscurece con la abundancia de "teoría" (Pétturson, 2003). Por lo general, la introducción de los conceptos sigue una secuencia fragmentaria que no ayuda a generar en los estudiantes una conciencia de que en las Ciencias se persigue la elaboración de teorías y modelos cada vez más universales (Doménech, 2000). Este objetivo científico es clarísimo en el caso de la Termodinámica, cuya perspectiva enlaza los mundos macroscópico y microscópico y sirve de puente en la construcción de la Dinámica de los procesos. Si en la enseñanza se obvia la integración de los distintos conocimientos en un *corpus* completo y general, se pierden ocasiones para que los alumnos conozcan a fondo la naturaleza y los objetivos de la Ciencia.

En los libros de texto abundan las analogías inadecuadas y las definiciones operacionales, elusivas, poco precisas u obsoletas desde el punto de vista del conocimiento científico actual (Bindel, 2004). Por ejemplo, al analizar las definiciones de calor y de energía que se recogen en los libros correspondientes a las materias de Física, Química, Biología y Ciencias de la Tierra, se observan concepciones radicalmente diferentes (e inconexas entre sí) en función del área de estudio (por ejemplo, Gayford, 1986; Barak, Gorodetsky y Chipman, 1997; Galley, 2004; Doige y Day, 2012; Lancor, 2014). Incluso se han observado libros de texto en los que el concepto de energía se presenta desde ópticas y modelos diferentes a lo largo de una misma unidad didáctica (Pérez Murugó y Marbà Tallada (2012), lo que hace pensar a los investigadores si los autores de los libros de texto partieron de algún planteamiento previo sobre qué modelo energético pretenden desarrollar. Dado que los alumnos no solamente aprenden Termodinámica cuando la estudian en el aula, es probable que esta falta de negociación de significados entre los libros de texto influya en el proceso de aprendizaje (Doige y Day, 2012). En particular, parece que las definiciones contenidas en los libros de Biología y Ciencias de la Tierra son en general más fragmentarias e imprecisas y están más alejadas de las ideas científicamente aceptadas. Algunos autores afirman abiertamente que la instrucción en Biología promueve la construcción de ideas alternativas sobre conceptos como el calor o la energía (Gayford, 1986; Galley, 2004).

La secuencia ordenada de los contenidos que los profesores suelen llevar a la práctica en la enseñanza de la Termodinámica básica es la que contienen los libros de texto, es decir, según enuncian Martínez y Pérez (1997): temperatura, termometría, dilatación térmica, y calor; a continuación calorimetría y trabajo; luego la energía interna, los enunciados de los principios de la Termodinámica y su fundamentación en el modelo cinético molecular. No es difícil percatarse de que

esta secuencia coincide en líneas generales con el desarrollo histórico de los conceptos termodinámicos. Sin embargo, en la enseñanza secundaria no se suele trabajar más allá de los conceptos de calor, trabajo y energía. En los primeros cursos, pocos libros incluyen la variación de entalpía como estimador de las transferencias de energía (Sözbilir, 2004a). En cursos posteriores, la unidad didáctica dedicada a Termodinámica continúa con la introducción de la variación de entalpía y su utilización como criterio para analizar el sentido de los balances de energía (Holman y Pilling, 2004). ΔH tiende a presentarse desde el punto de vista algorítmico, y los pocos libros de texto que incluyen una interpretación microscópica aluden a la entalpía de enlace como una *forma de energía* almacenada en los enlaces (Barker y Millar, 2000). En este punto de la intervención, lo usual es que los alumnos pasen a resolver ejercicios numéricos sobre los balances energéticos de procesos físicos y químicos, manipulando datos de variación de entalpía (Carson y Watson, 1999; Teichert y Stacy, 2002) sin necesidad de interpretarlos. Prácticamente todas las tareas de perfil cualitativo se resuelven apoyando las descripciones y explicaciones en los conceptos de calor y *energía química* (Sözbilir, 2004a). Para terminar el estudio de la Termoquímica, en ocasiones se introducen aspectos sobre las tablas de datos termodinámicos. Algunas propuestas incluyen, como colofón, una interpretación microscópica de la variación de entalpía mediante los modelos de partículas y de enlace químico. En bastantes libros de texto, las entidades termodinámicas se definen una tras otra sin establecer conexiones conceptuales entre ellas. Nociones como la exotermia/endotermia, las variaciones de entalpía o la entalpía de enlace aparecen bajo apartados diferentes y aislados entre sí; en algunos manuales de nivel universitario, los modelos interpretativos que permiten integrar todos estos conceptos se presentan al lector después de varios capítulos (Ben-Zvi *et al*., 1993).

De la Termoquímica se pasa a la Termodinámica Química con la presentación de la entropía en su definición macroscópica. Sobre esta base se expresa el segundo principio de la Termodinámica. La interpretación microscópica de la entropía suele obviarse casi siempre, así como el tercer principio de la Termodinámica; y en los pocos libros de texto en los que figuran, apenas se llegan a utilizar para analizar los cambios que experimentan los sistemas termodinámicos. Partiendo de la entropía, se expone el concepto de espontaneidad y, raras veces, el de irreversibilidad. Finalmente, y después de la definición operativa de la energía de Gibbs, a través de la ecuación fundamental de la Termodinámica se incluye ΔG como el criterio para decidir si un proceso es o no espontáneo en unas condiciones dadas. Inmediatamente se pasa a realizar cálculos sobre la espontaneidad de las reacciones, los intervalos de temperatura en los que éstas se favorecen, y el estado se equilibrio del sistema en distintas condiciones (Banerjee, 1995). Lo más frecuente es que los libros de texto y los profesores no mencionen siquiera qué significa la energía de Gibbs y cómo se justifica de manera teórica su introducción para estudiar los procesos termodinámicos (Bindel, 2004).

En este estado de cosas, no sorprende que los alumnos lleguen a los niveles superiores de enseñanza con multitud de ideas alternativas y problemas de comprensión: si no se construyen los conocimientos científicos en el aula de Ciencias, el aprendizaje o tendrá lugar por otras vías donde los adolescentes no cuentan con ayuda de los profesores, o no tendrá lugar. Para evitar que los estudiantes de Bachillerato y Universidad sigan intentando construir los conceptos básicos después de varios cursos, sin poder avanzar en los ámbitos de la Termodinámica y el Equilibrio Químico, algunos investigadores sugieren que se introduzca el estudio de la Termodinámica Química en los niveles más básicos de la Química general (Bergquist y Heikkinen, 1990). Por el contrario, otros autores consideran que la demanda cognitiva que se requiere en el aprendizaje de la Termodinámica excede con mucho las capacidades del alumnado de secundaria; si se tiene en cuenta, además, que en la comunidad científica no se ha zanjado aún la controversia epistemológica sobre la naturaleza de la energía y de sus mecanismos de transferencia, la polémica está servida.

La gran controversia sobre la eliminación de la Termodinámica de la enseñanza secundaria comenzó en el seno de la comunidad didáctica en los años 80, aunque algunos autores se habían manifestado antes al respecto, como Wright (1974) o Battino (1979) en contra, u Ogborn (1974, 1976) y Campbell (1979) a favor. Los argumentos de los detractores de la enseñanza de la Termodinámica se centraban en la demanda cognitiva de los conocimientos conceptuales y procedimentales, y en aspectos actitudinales como la poca importancia que los alumnos dan a esta disciplina y la inseguridad que les produce estudiarla (Battino, 1979). Frente a estos argumentos, los defensores de la enseñanza de la Termodinámica esgrimieron la relevancia social, económica y política de la materia y la necesidad de su aprendizaje tanto para los futuros científicos, que deben alcanzar un buen nivel de comprensión en Ciencias antes de entrar en la Universidad, como para la población en general, que debe tomar razonadamente decisiones sobre las cuestiones de base científica y tecnológica que le afectan (Campbell, 1979). A lo largo de la década de los 80 aumentó extraordinariamente el número de publicaciones sobre este tema y se levantó una encendida polémica sobre la conveniencia de demorar varios cursos la introducción del concepto de energía o incluso eliminarlo de los *curricula* de la enseñanza secundaria (Sánchez Mambrilla, 1983a). Los orígenes de la polémica se remontan a los primeros estudios sobre ideas alternativas, de los cuales algunos autores concluían que la comprensión de la energía depende en gran medida de la madurez biológica del individuo (ver, por ejemplo: Warren, 1986). El debate se propagó en una serie de réplicas y contrarréplicas que se recogieron en las revistas *European Journal of Science Education* y *Physics Education*, a lo largo de varios volúmenes correspondientes a los años 1981-1984. Autores como Sexl (1981) y Duit (1981) discutieron si los alumnos de enseñanza secundaria tienen o no la capacidad necesaria para conceptualizar que la

conservación de la energía se traduce cuantitativamente como un valor numérico que se mantiene constante en cualquier transformación realizada en el universo, de acuerdo con la definición de Feynman. Sexl concluyó que la enseñanza no debe empecinarse en concretar aquellas magnitudes no susceptibles de una definición basada en procedimientos operacionales, incluida la energía; los aspectos conservativos de ésta, por su importancia en la interpretación de la realidad que nos rodea, se podrían introducir mediante el análisis de diversos sistemas aislados para, a continuación, relacionar con el trabajo los cambios energéticos en los sistemas no aislados. Por su parte, Duit argumentó en contra de Sexl apelando a las dificultades de los alumnos para aprender la noción de conservación de energía a partir de una aproximación tan abstracta, y propuso la discusión paulatina de ejemplos sencillos (como los péndulos) para llegar a contruir la idea de conservación "paso a paso". Al año siguiente, Warren (1982) propuso que no se hable de la energía en los primeros años de la escolarización, hasta que los estudiantes puedan aproximarse a este concepto a través de las nociones de trabajo y fuerza. En 1983, Warren escribió una réplica a Schmid (1982), quien había propuesto una aproximación fenomenológica similar a la de autores como Duit (1981), pero más próxima a las experiencias sensoriales y cotidianas de los alumnos y peligrosamente cercana a las concepciones materialistas de la energía, por sugerir la introducción de entidades "transportadoras" de energía que no serían objetos sino cantidades abstractas relacionadas con ellos, pero que los estudiantes podrían identificar con los objetos en sí (Warren, 1983). En 1986, Warren añadiría que se debe comenzar por definir la energía mediante el lenguaje matemático, una vez que los alumnos tengan capacidad para asimilar estas nociones. Para Warren (1983), los intentos didácticos unificadores de la Física en los años más tempranos del aprendizaje, cuando los niños no han formado una visión general de la Ciencia, los llevan a desarrollar representaciones inadecuadas de la energía.

En cuanto a la *clásica* definición de la energía como capacidad para realizar trabajo, ya se había criticado en los estudios epistemológicos de los años 70 (Lehrman, 1973), y la controversia continuó durante los años 80 y 90 (Sexl, 1981; Hicks, 1983; Trumper, 1990a y b, 1991): en efecto, no toda la energía de un sistema se puede transferir por trabajo (desde luego, no en el marco de validez del segundo principio de la Termodinámica), y si un sistema disminuye su capacidad para realizar trabajo, no necesariamente ha disminuido su cantidad de energía (Pintó, 2004). Además, esta definición científicamente obsoleta y bastante restringida dificulta la introducción de las nuevas teorías de la Física, como la de la Relatividad (de Berg, 1997), y es tan breve y fácil de memorizar que los estudiantes pueden continuar utilizándola de manera mecánica aun cuando se les haya presentado solamente de manera provisional (Hicks, 1983). Incluso algunos autores que la consideran científicamente adecuada rechazan su introducción por considerar que es una definición demasiado "académica" y abstracta para el alumnado (Schmid,

1982). Ante la dificultad de llegar a un consenso sobre este tema, varios investigadores optarían abiertamente por eliminar de la enseñanza las nociones de calor y trabajo, y pasar a fundamentar la explicación de los fenómenos termodinámicos solamente en la energía y su conservación y degradación (Kemp, 1984; Barrow, 1988). Sin embargo, esta perspectiva no resulta útil para estudiar los cambios materiales, porque elimina la comprensión de los mecanismos por los cuales varía la cantidad de energía de los sistemas a causa de los procesos (Mallinckrodtt y Leff 1992; van Roon, van Sprang y Verdonk, 1994).

Otros autores propusieron que se introduzca una perspectiva abierta de la energía para ayudar a los alumnos a entender la validez del concepto en múltiples situaciones y contextos (Sevilla, 1986; Trumper, 1990b), sin llegar a construir una definición concreta, aunque se puede recurrir a definiciones meramente operativas, sobre todo en la enseñanza universitaria (Trumper, 1991). Años más tarde, Meltzer (2004) sugeriría que se construyan las bases didácticas de la Termodinámica sobre el primer principio y la conservación de la energía, y que después se definan el calor y el trabajo como los mecanismos por los que la energía se transfiere entre el sistema y el entorno durante los procesos termodinámicos.

En cuanto a la carga teórica y los posibles enfoques de enseñanza más útiles para introducir el concepto de energía, volvamos a los años 80. En 1986, Solomon entraba en el debate para exponer su punto de vista: se debe partir de las experiencias cotidianas de los que aprenden, analizando la polisemia y ambigüedad del lenguaje cotidiano y contraponiéndola a la terminología científica. Según esta investigadora, cuanto antes se aborde la enseñanza de la energía, antes dispondrán los alumnos de uno de los conceptos más útiles de la Ciencia (Solomon, 1986, Trumper, 1991b). Autores como Taber (1989) van más allá y afirman que sin la energía no se puede aprender una Física "genuina".

Un año después, Duit (1987) defendía que la enseñanza de la noción de energía comience en los primeros cursos de Ciencias. Existe la posibilidad de presentarla como una entidad *quasi*-material para, más adelante y con ayuda de las matemáticas, sentar las bases de un significado más cercano a la ciencia escolar. Pero las investigaciones realizadas en el marco teórico del cambio conceptual obligan a desechar esta propuesta, que, además de reforzar ideas alternativas bastante contradictorias con las actuales teorías científicas (Millar, 2005), dificulta el cambio conceptual (como reconoce el propio Duit), porque obliga a los alumnos a desplazar sus concepciones iniciales en favor de otras que se encuadran en categorías ontológicas diferentes (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994).

Aunque con menor intensidad que en los años 80, esta polémica continuó viva durante años. De hecho, en la primera década del siglo XXI, la conveniencia de evitar la enseñanza de la energía a los alumnos que no hayan alcanzado la madurez cognitiva necesaria para construir el concepto científico sigue teniendo partidarios

(ver Liu y McKeough, 2005) y detractores (Smith, Maclin, Houghton y Hennessey, 2000). Para algunos autores, ni siquiera los universitarios de primer curso "serían capaces de entender los conceptos (…), más allá de fórmulas matemáticas en ejercicios algorítmicos" (Quílez, 2009), y proponen que las relaciones entre la energía de Gibbs, el avance de la reacción y el estado de equilibrio se pospongan a cursos más avanzados (¡!).

A este respecto, las *Taxonomías para el Análisis del Currículo* de (Shayer y Adey, 1986) indican que la tercera parte del alumnado de 13 a 14 años es capaz de utilizar el modelo cinético molecular para interpretar fenómenos termodinámicos sencillos. Además, investigaciones como las realizadas en nuestro Departamento (Domínguez, García-Rodeja, Illobre, Castro Fucci, García y Rocha, 1995; Domínguez Castiñeiras, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1998a; Domínguez, De Pro y García, 1998b) demuestran que desde la enseñanza de las Ciencias se puede ayudar a los alumnos de 12 ó 13 años a utilizar de manera consistente el modelo de partículas para explicar fenómenos térmicos como el incremento de temperatura del sistema y la dilatación. Por otra parte, al analizar las TAC se observa que el nivel de desarrollo de la estructura cognitiva que se necesita para comprender los conceptos termodinámicos y sus aspectos microscópicos no es superior al que se requiere para entender los principios de Newton, cuya incorporación en el *curriculum* no se cuestiona (Sevilla, 1986).

¿Qué ideas sobre la energía se pueden trabajar en el aula de secundaria, o qué modelo de energía se pretende que construyan los alumnos (Pintó, 2004)? Para Solbes y Tarín (2008), al revisar la historia de la Ciencia se pone de manifiesto que no es conveniente definir el concepto de energía de manera cerrada, porque la noción científicamente aceptaba ha ido cambiando (y es previsible que aún se modifique). Lo que sí parece claro es que las ideas de los estudiantes pueden evolucionar hacia las científicamente aceptadas si se amplían sus concepciones iniciales, basadas en las sensaciones y experiencias personales, más allá de la perspectiva antropocéntrica y vitalista. Para ello los investigadores proponen que en la enseñanza se introduzcan las nociones de conservación y degradación de la energía (Driver y Warrington, 1985), a las que se pueden añadir su transformación y su *transporte* o transferencia (Duit, 1981, 1984, 1986; Duit y Häussler, 1994) para formar la "cuadriga de la energía" (Duit y Häussler, 1994). Desde el punto de vista científico, es más riguroso hablar de transferencia de energía que de transporte, para evitar la concepción materialista (Ellse, 1998; Pintó, 2004). Además, siempre resulta más sencillo y funcional adoptar aquellos modelos que utilicen el menor número de entidades y proposiciones para construir una explicación, como dijo en su día G. de Ockham (Millar, 2005). Pero en las aulas parece que los aspectos energéticos se limitan casi siempre a la conservación, encaminada a resolver ejercicios de cálculo. En las baterías de actividades de algunos libros de texto se recogen algunas tareas relacionadas con la conservación de energía en situaciones en las que existe

rozamiento, pero en general la degradación de la energía apenas se desarrolla. También los profesores priman la conservación de la energía frente a los demás aspectos (Doménech *et al.*, 2013): la transferencia y la degradación de la energía no llegan al 10% de aceptación entre los docentes en activo, y apenas lo sobrepasan entre los docentes en formación (Solbes y Tarín, 1998).

Dado que la energía es uno de los conceptos más globales e integradores de las Ciencias, se han elaborado varias propuestas didácticas innovadoras que parten de su construcción para llegar a conectar entre sí varias disciplinas científicas. Por ejemplo, se ha sugerido convertir la energía en un puente de unión entre la Mecánica y la Termodinámica (Doménech, Doménech y Martínez, 1993; Reif, 1999), o en un pilar para estructurar todas las propuestas didácticas de Física sobre la base de los principios de conservación y degradación de la energía (Solbes y Tarín, 2004; Solbes, Guisasola y Tarín, 2009), o en el eje del que hacer partir toda una perspectiva moderna y unificadora de la Física (Drago, 1994; Pérez *et al.*, 1995; Varela *et al.*, 1997; Pérez-Landazábal y Varela-Nieto, 2006; Hecht, 2007). Sin embargo, estas propuestas raramente salen del ámbito de la Física.

Pero la primera dificultad didáctica ya surge con la introducción del concepto de energía: ¿cómo se debe realizar: deductivamente a partir del teorema de las fuerzas vivas y/o de la utilización de la cantidad de movimiento relativista, o sobre una base más termodinámica?

No son pocos los autores partidarios de comenzar por la relación entre la conservación de la energía en Mecánica y Termodinámica, o construir el primer principio a partir del teorema de las fuerzas vivas (Sherwood 1983; Bernard, 1984; Erlichson 1984, 1986; Kemp 1985; Bauman 1992a,b; Mallinckrodtt y Leff 1992; Leff y Mallinckrodtt 1993; Alonso y Finn, 1995, 1996; Cotignola *et al.*, 2002). Pero estos enfoques deben ser muy cuidadosos, porque la asimilación del primer principio de la Termodinámica con la conservación de la energía mecánica es inadecuada (Solbes y Tarín, 1998): éste es un teorema aplicable únicamente en las situaciones en las cuales se verifican los principios de la Dinámica newtoniana, mientras que el primer principio se cumple siempre. Recordemos también que el teorema de las fuerzas vivas no tiene validez general (Doménech, 2000) y su aplicación se limita a los objetos que puedan considerarse puntuales y sometidos únicamente a fuerzas no conservativas. Los límites de validez de la conservación de la energía mecánica aparecen en casi un 60% de los libros de texto. Por otra parte, la mitad de los profesores en activo y cerca de un 90% de los que están en formación parecen tener dificultades en diferenciar un principio de un teorema (Solbes y Tarín, 1998).

Las propuestas de enseñanza tradicionales parten de la definición del trabajo y se quedan en el ámbito de la Mecánica, limitándose a introducir las energías cinética y potencial con la finalidad de llegar al enunciado del principio de conservación de la energía mecánica (Pérez-Landazábal y Varela-Nieto, 2006).

Cuando, al abordar otros campos de la Física, reaparecen la energía y sus transformaciones y transferencias, pocas veces se establece la relación con lo ya estudiado en el tema de Mecánica. Por lo general, la conservación de la energía solamente se aplica a la interpretación de fenómenos mecánicos o termodinámicos (Solbes y Tarín, 2004). Aunque no llega a la cuarta parte la proporción de docentes que presentaría la energía exclusivamente desde la Mecánica, son menos de un 10% los que abogan por introducirla desde la Termodinámica. Se suele establecer explícitamente la relación entre la variación de la energía del sistema y las transferencias de energía calor y trabajo, pero cada una de ellas se trata por separado. En cuanto al trabajo, en general no se lo llega a relacionar con los problemas mecánicos donde se observa la disipación de energía por calor.

En algunas ocasiónes se presenta un principio de conservación de la energía generalizado, pero pocas veces se indica que éste es un principio de toda la Física y no solamente de la Mecánica o la Termodinámica. La mayoría de los libros de texto cita que se conserva la energía en sus múltiples tipos: mecánica, eléctrica y magnética, térmica, química, luminosa, acústica… y así hasta varias decenas de tipos de energía, según Taber (1989). Entre sinónimos, términos ambiguos y otros inapropiados, los libros de texto generan un repertorio caótico de energías, y esta clasificación tan ecléctica puede inducir confusiones ontológicas en el alumnado (Ellse, 1988; Pintó, 2004; Millar, 2005). A medida que aumenta el nivel educativo disminuye el número de tipos de energía que se contemplan en los libros. Reducir la energía a solamente dos clases, cinética y potencial, es útil desde el punto de vista didáctico, pero revela una concepción mecanicista de la Física al olvidar la energía de los campos (Solbes y Tarín, 1998). Un 40% de los profesores piensa que toda la energía puede reducirse a cinética y potencial, sin considerar la de los campos y de la masa en reposo (Solbes y Tarín, 1998). La mayoría de los investigadores está de acuerdo en desterrar de la enseñanza la expresión "formas de energía" para evitar que se desarrolle una concepción de ésta como una entidad material que puede adoptar distintas apariencias. Para algunos, este tipo de expresiones puede utilizarse en el nivel universitario con la finalidad de construir un lenguaje intermedio entre el cotidiano y el científico (Kaper y Goedhart, 2002). Las *formas de energía* aceptables serían la cinética, la potencial y la interna (funciones de estado).

Otro posible modelo de energía parte de la definición de ésta como una propiedad que se asocia a cada estado de un sistema y ayuda a analizar los cambios en el estado termodinámico. Si el sistema es aislado, el número mediante el que se representa la energía permanece constante. Con esta definición, se puede definir para la energía una función que depende de ciertas variables independientes (por ejemplo, masa y velocidad para la energía cinética), y así llegar a calcular variaciones de energía. Éste es quizá el modelo de energía más elegante, afinado y riguroso que se ha formulado; su principal inconveniente es que no se ajusta lo suficiente a las posibilidades e intereses del alumnado de secundaria (Pintó, 2004).

Una propuesta muy completa para la enseñanza de la energía en Bachillerato es la de Solbes y Tarín (1998), que también se describe en Tarín (2000) y Solbes y Tarín (2004). Estos autores prefieren seguir el desarrollo histórico del concepto de energía y mostrar sus limitaciones actuales, definiéndola como la «capacidad de un cuerpo para transformar la materia». Según el modelo de energía que defienden Solbes y Tarín (1998), la energía como "propiedad de los sistemas que sólo cambia cuando se producen interacciones" constituye una definición poco selectiva, en el sentido de que se puede afirmar esto mismo de otras magnitudes como la cantidad de movimiento o el momento angular. Después de la definición de energía se introducen la conservación de la energía mecánica y sus limitaciones, que llevan al primer principio de la Termodinámica. En el nivel de Bachillerato sería conveniente señalar cómo el concepto de campo electromagnético y la teoría especial de la relatividad de Einstein han generado nuevas perspectivas sobre la energía y su conservación. A lo largo del desarrollo de la propuesta, se pretende que el estudiante construya una idea de la energía como una magnitud que se conserva en un sistema aislado. Se identifican después los tipos de energía, cuya contribución a la energía total puede variar con el tiempo mediante las transformaciones de uno a otro tipo, verificándose que el cómputo total se conserva. La energía interna se define como la suma de las energías cinética y potencial de una gran cantidad de partículas. Hasta este punto se tratan las propiedades de transformación, conservación y transferencia, y para completar la descripción de la energía solamente falta la idea de degradación, necesaria para comprender que en la naturaleza los sistemas evolucionan en un solo sentido (espontaneidad) debido a los procesos microscópicos de dispersión de la energía, que determinan la irreversibilidad. Ésta permite interpretar problemas en los que interviene el rozamiento y resolver la aparente paradoja que hay entre la idea científica de conservación de la energía y la idea que difunden los medios de comunicación sobre el consumo, la crisis energética y el agotamiento energético (Duit, 1986; Goldring y Osborne, 1994; Doménech *et al.*, 2003; Solbes y Tarín, 2004; Millar, 2005; Doménech *et al.*, 2013).

Desde su propuesta, encuadrada en el campo de la Física, Solbes y Tarín (1998) sugieren que en el segundo curso de Bachillerato se aprovechen todas las ocasiones para hacer explícito que la conservación de la energía no se reduce a las interacciones gravitatoria y eléctrica, sino que constituye un principio de toda la Física, aunque puede adoptar tratamientos cuantitativos más sencillos (escalares) que los dinámicos (vectoriales). También existe la posibilidad de comentar otras nociones, como las transferencias de energía mediante ondas mecánicas y electromagnéticas, la energía continua y deslocalizada en el frente de ondas, la energía (relativista) en reposo y la equivalencia entre masa y energía, la cuantización energética, la interpretación probabilista de Born, la relación de indeterminación de Heisenberg energía-tiempo…

Según Alonso y Finn (1995, 1996), sin casi desarrollo previo se puede partir directamente de la conservación de la energía mecánica, macroscópica, e introducir la idea de que los sistemas materiales están compuestos por un gran número de partículas que establecen interacciones entre ellas y con los alrededores. Dado que las partículas tienen sus propias energías cinética y potencial microscópicas, cuya suma es la energía interna, se consigue relacionar la estructura atómico-molecular del sistema con las transferencias de energía a nivel macroscópico. Así, desde el teorema de las fuerzas vivas se llega al primer principio de la Termodinámica. Pero, aunque el tratamiento conceptual y procedimental sea muy preciso y cuidadoso, este desarrollo general corre el riesgo de sugerir que la Termodinámica deriva de la Mecánica o que ambas comparten objetivo y métodos, lo cual no es cierto (Mallinkrodt y Leff 1992; Doménech, 2000). Puede crearse una mayor confusión si no se establece claramente la diferencia entre la conservación de la energía mecánica y el primer principio de la Termodinámica, relación que apenas figura en los libros de texto de Física (Bauman, 1992a,b; Saltiel 1997; Solbes y Tarín 1998). Además, la mayor parte de ellos utiliza el teorema de las fuerzas vivas más allá de sus límites de validez (Michinel y D'Alessandro, 1994).

A propósito del enfoque mediante el cual se presenta la energía a través de la cantidad de movimiento relativista, se ha detectado que los alumnos tienen dificultades para manejar una energía cinética relativa en relación con la velocidad relativa según el sistema de referencia (ver Doménech, 2000). Estas dificultades se enmarcan en el campo de la Relatividad galileana (ver Prado Orbán, 2010).

Dado que el abuso de los tratamientos cuantitativos tiende a transmitir una visión distorsionada y empobrecida de la Ciencia que puede generar actitudes de inhibición y rechazo hacia el aprendizaje, y como además resulta tan difícil establecer un modelo concreto de energía que sea a la vez científicamente aceptable y didácticamente asequible, cada día gana más partidarios la visión de no definir la noción de energía (Hierrezuelo Moreno y Molina González, 1990). Esta opción parece incomodar más a los profesores e investigadores en Didáctica de las Ciencias que a los estudiantes, quienes no sienten la necesidad de definirlo todo (Pintó, 2004). Doménech *et al.* (2003) consideran que la cuestión no está tanto en partir de una concepción muy precisa del concepto, sino en planificar la construcción de significados como el fruto de aproximaciones significativas sucesivas, lo que al mismo tiempo es coherente con la idea de que los conocimientos científicos son construcciones tentativas destinadas a resolver problemas de manera cada vez más fructífera. Así pues, las definiciones iniciales que se utilizan para presentar los conceptos al alumnado no deben juzgarse a la luz del cuerpo de conocimientos científicos, sino por su capacidad para facilitar el proceso de aprendizaje, que implicará necesariamente la evolución de los primeros planteamientos hacia concepciones más elaboradas. Desde este punto de vista, una definición abierta de la energía puede concretarse mediante la utilización de ésta como un instrumento para

el estudio y cuantificación de las transformaciones: los cambios que experimenta un sistema son debidos a la capacidad de la materia para interaccionar de diferentes maneras (Doménech *et al.*, 2003). Asociando la idea de energía a la búsqueda de vínculos entre los distintos cambios, se evitan las concepciones materialistas de fluido o combustible. Para evitar el refuerzo de la estructura alternativa de las "formas de energía", Doménech *et al.* (2003) plantean que los distintos tipos de energía se relacionen con diferentes configuraciones de los sistemas y distintas formas de interaccionar de la materia, en la línea que proponen Ogborn (1986), Pintó Casulleras (1991) o Kaper y Goedhart (2002). Otros autores, como Doige *et al.* (2012), sugieren que desde cada área de las Ciencias se aporten varias metáforas distintas que se complementen para llegar a formar una concepción abierta de la energía.

Pero, aunque no hay un consenso amplio sobre qué enfoques son los más adecuados para desarrollar el concepto de energía, los investigadores coinciden en una idea: hay que erradicar la visión materialista tanto de ésta (Carson y Watson 1999) como de sus procesos de transferencia calor y trabajo, así como de las variables termodinámicas principales y sus variaciones. Debe ponerse de manifiesto que la energía no tiene una naturaleza sustancial y que por tanto no se la puede definir como una entidad independiente del estado del sistema, sino en términos de interacciones entre distintas partes de éste y entre éste y el entorno. No tiene sentido hablar de la energía de un sistema aislado (Doménech, 2000), porque ésta es una propiedad de los sistemas relacionada con las interacciones, y se asigna al sistema que interacciona, no a los objetos de la interacción. Además debe ponerse de manifiesto que tampoco tiene sentido determinar el valor absoluto de la energía de un sistema; sólo podemos determinar sus variaciones cuando tiene lugar un determinado proceso.

En cuanto al concepto de energía en los libros de texto, las tres definiciones más frecuentes son las siguientes: la energía como capacidad del sistema para realizar trabajo, la energía como entidad que causa los procesos o que "hace que las cosas funcionen" (Ogborn, 1986), y la energía como la capacidad de un sistema para experimentar cambios (Sevilla, 1986; Chisholm, 1992). Con frecuencia, para ilustrar estas definiciones se utilizan metáforas que encajan este concepto en la categoría ontológica de materia (Lancor, 2014).

La definición más común en los libros de Física es sin duda la primera. Pero, al mismo tiempo que se concibe la energía como la capacidad para hacer trabajo y/o calor (Bañas, Mellado y Ruiz, 2004), algunos autores definen el trabajo como la transferencia de energía de un cuerpo a otro (ver Warren, 1982). Otros especifican que es el trabajo acumulado que se almacena en los cuerpos y se manifiesta en ciertas propiedades de éstos (Bañas, Mellado y Ruiz, 2004). Los pocos textos de Biología que la relacionan con el trabajo no especifican qué entienden por "trabajo" Gayford, 1986; Kaper y Goedhart, 2002); otros optan por presentar la energía como la capacidad de mantener el sistema en un estado ordenado (Gayford, 1986; Barak,

Gorodetsky y Chipman, 1997), en un intento por acercarse al segundo principio de la Termodinámica.

La segunda definición de la energía (el motivo por el que suceden los procesos) convierte a ésta en un agente causal, lo que la aleja del concepto científico (Swackhamer, 2005) y la acerca peligrosamente al de *fuerza vital* de la teoría vitalista. No debe olvidarse que muchos estudiantes construyen explicaciones muy diferentes de los fenómenos dependiendo de si éstos suceden en un ser vivo o en un sistema inerte (Barak, Gorodetsky y Chipman, 1997; Oztas, 2009), porque creen que los seres vivos se escapan a las leyes y principios de la Física y la Química.Un 70% de los maestros de primaria también sostiene una perspectiva vitalista (Kruger *et al.*, 2002). Si los alumnos aprenden la noción científica de energía, tienden a abandonar las interpretaciones vitalistas a favor de la aplicación de los nuevos conocimientos en los contextos biológicos (Barak, Gorodetsky y Chipman, 1997; Oztas, 2009).

Una definición no tan frecuente en los libros de Biología es la que más se acerca a la ciencia escolar: la energía como capacidad para producir cambios. Pero, en general, la concepción de la energía como una propiedad de los sistemas materiales no es común en los textos de Biología (Pérez Murugó y Marbà Tallada (2012). Algunos la presentan como medida del cambio físico o interacción en los sistemas materiales (Lancor, 2014). Desde la literatura en Didáctica de las Ciencias se insiste en que esta definición, relativamente moderna e ilustrativa de la evolución conceptual que ha experimentado el tema de la energía desde el siglo XIX hasta la actualidad (Solbes y Tarín, 2004), ya se ha quedado obsoleta y además complica la enseñanza de los nuevos conceptos de la Termodinámica, por acercar el significado de la energía del sistema al de la energía de Gibbs; esta visión de la energía se pone de manifiesto en muchas situaciones cotidianas (Stylianidou y Boohan, 1998). Recordemos que la capacidad de cambio de los sistemas viene dada por la energía útil o aprovechable, G, no por la energía total del sistema. Sin embargo, algunos autores apoyan esta definición porque al menos convierte la energía en una cantidad relativa (Trumper, 1990b, Hecht, 2007), lo que enfatiza en la idea de un flujo continuo de energía dentro de los cuerpos (Lancor, 2014).

A pesar del consenso mayoritario sobre la necesidad de erradicar la visión materialista de la energía y otras magnitudes relacionadas con ella, bastantes libros de texto contienen ecuaciones químicas que incluyen el calor, la energía o la variación de entalpía como un sumando más, en lo que parece una sugerencia de que q, E y/o ΔH pueden ser reactivos o productos de las reacciones químicas (Niaz, 2006). Por poner algunos ejemplos:

$$\text{Reactivos} \rightarrow \text{Productos} + Q \text{ [exotérmica]}$$

$$\text{Reactivos} + Q \rightarrow \text{Productos [endotérmica]}$$

$3H_{2\,(g)} + N_{2\,(g)} \rightarrow 2NH_{3\,(g)} + \text{Calor}$ recogidos en (Niaz, 2006)

Los manuales universitarios tampoco se libran de estas ideas alternativas sobre el calor y los fenómenos térmicos (Alomá y Malaver, 2009). Y algunas actividades pertenecientes a propuestas de enseñanza innovadoras en Didáctica de las Ciencias también contienen este tipo de deslices, como sucede con el *item* 3 de la batería de cuestiones que utilizó Banerjee (1995), en la que la ecuación química se enuncia como "reacción" y se escribe en una suerte de lenguaje *pseudo*-matemático:

$CO_{(g)} + Cl_{2\,(g)} = COCl_{2\,(g)} + Calor$ *item* 3, (Banerjee, 1995)

Tampoco es extraño encontrar en los libros de Ciencias de la Tierra algunos errores conceptuales recurrentes sobre la naturaleza de los procesos de transferencia de energía, que suelen definirse como *formas de energía* (Peckham y McNaught, 1993) o conversiones entre *formas de energía*. Estas ideas alternativas pueden enlazar directamente con otras que son abiertamente contradictorias con el conocimiento científico. Por ejemplo, en un libro sobre el consumo social de la energía y sus repercusiones sobre el medioambiente se lee: «las células solares tienen la ventaja de que no hay contaminación (o muy poca) en su uso. Porque convierten la luz directamente en electricidad, no se restringen según las limitaciones fundamentales de la segunda ley de la Termodinámica como las máquinas térmicas» (Bindel, 2004).

Según Doménech *et al*., (2003), las definiciones de los procesos de transferencia de energía pueden realizarse de manera cualitativa: el trabajo se presenta como el acto de transformar la materia aplicando fuerzas, lo que lo vincula a los intercambios de energía entre diferentes sistemas o entre distintas partes de un mismo sistema. El concepto de calor se define, en el marco del modelo cinético molecular, como una magnitud que engloba el conjunto del gran número de (micro)trabajos realizados a nivel microscópico, como consecuencia de las (micro)fuerzas exteriores que actúan sobre las partículas del sistema al poner en contacto sistemas a distintas temperaturas. Estas definiciones abren la puerta a una profundización en los conceptos de energía, calor y trabajo mediante la teoría corpuscular, lo que permite integrar la Mecánica y la Termodinámica. Sin embargo, no se debe olvidar que las variaciones de energía pueden deberse a mecanismos distintos del trabajo y el calor, como los intercambios de radiación o materia, aspectos que no se recogen en la investigación didáctica (Doménech *et al*., 2003).

La cantidad y variedad de definiciones de calor que se recoge en los libros de texto es notable, y lo más frecuente es que se lo considere una entidad material, una *forma de energía*, energía en tránsito o un indicador de la energía cinética molecular; también existen variantes híbridas de estas definiciones.

En los libros de Física predomina claramente la concepción del calor como una forma de energía (Michinel y D'Alessandro, 1994) o como energía en tránsito debida a la diferencia de temperatura entre cuerpos (Doige y Day, 2012), definiciones de una cierta antigüedad (Zemansky, 1970), que en algunos textos coexisten con la científica; pero todos o casi todos los libros de los primeros cursos

de la enseñanza secundaria contienen un apartado cuyo título "formas de propagación del calor" potencia la idea de que el éste es una entidad que pasa de unos cuerpos a otros (Bañas, Mellado y Ruiz, 2004). Para denominar el calor también se utiliza la expresión *energía térmica* (Michinel y D'Alessandro, 1994), que algunos investigadores consideran inadecuada porque puede promover identificaciones alternativas entre la temperatura, el calor y la energía interna (Zemansky, 1970; Cotignola *et al.*, 2002; Doige y Day, 2012). Aunque con *energía térmica* casi todos los libros de texto se refieren a la componente de la energía interna relacionada con la translación de las partículas del sistema, esta terminología podría reforzar la concepción del calor como una forma más de energía interna.

Estas ideas también aparecen en bastantes libros de Biología y Ciencias de la Tierra (Jasien y Oberem, 2002; Loverude *et al.*, 2002; Meltzer, 2004). Pero en estos ámbitos las concepciones mayoritarias asimilan el calor a la energía cinética atómico-molecular del sistema, a la cantidad de energía susceptible de ser medida con la temperatura, o a la energía "degradada", subproducto del metabolismo celular, que no puede transferirse por trabajo (Doige y Day, 2012). Algunos textos de Geología presentan el calor, análogo a la luz, como una forma de energía electromagnética que tiene una longitud de onda precisa. Puede que esta definición tenga su origen en el procedimiento experimental de medida del "calor" del planeta: utilizando sensores vía satélite se detectan las diferentes longitudes de onda de la radiación electromagnética de la superficie terrestre o de la atmósfera, y los datos se traducen en "imágenes térmicas" o "mapas térmicos" que proporcionan información sobre la temperatura de áreas y objetos.

A la vista de las complicaciones que introduce la polisemia del sustantivo calor y de los verbos calentar/enfriar (Domínguez Castiñeiras, 2000), algunos autores, como Heath (1976), Summers (1983), Romer (2001) o Craig y Gislason (2002), proponen eliminar el sustantivo de la enseñanza para evitar su identificación con la temperatura y la concepción de ésta como el grado de "calentamiento" de un cuerpo. En cambio, otros consideran que el vocablo calor debe mantenerse en las aulas, y que los profesores deben hacer explícita su relación con la energía interna (Hierrezuelo y Montero, 1987), a la vez que se evitan las expresiones que puedan reforzar la impresión de que el calor es una sustancia contenida en los cuerpos: "adición de calor", "flujo de calor"… (Falk, Herrmann y Schmid, 1983; Duit, 1987; Louisa, Veiga, Pereira, &Maskill, 1989; Cotignola *et al.*, 2002; Swackhamer, 2005).

Algunos optan por erradicar o limitar las nociones históricamente vinculadas a la teoría del calórico, que por otra parte no son función de estado (Cotignola, Bordogna, Punte y Cappannini, 2002): el calor latente, la capacidad calorífica y el calor específico. Si se mantienen en la enseñanza, se recomienda que las aproximaciones didácticas enfaticen en la relación que existe entre estas magnitudes y las variaciones de las funciones de estado del sistema.

Recordemos que para completar un aprendizaje significativo y funcional sobre la energía deben enseñarse las transferencias energéticas y los principios de conservación y degradación (Solbes y Tarín, 1998, 2004; Duit y Häussler, 1994; Trumper, 1990a; Hecht, 2007; Nordine, Krajcik y Fortus, 2010); algunos autores incluyen además las fuentes energéticas (Lee y Liu, 2010; Lancor, 2014).

En lo que respecta a la conservación de la energía en Termodinámica, los libros de texto suelen definirla breve y macroscópicamente, y a renglón seguido aportan su ecuación matemática sin hacer explícito qué significa ésta. A continuación, pasan a relacionar desde el punto de vista matemático las funciones energía interna y variación de entalpía, porque el objetivo que se persigue es la aplicación directa de ecuaciones matemáticas para el cálculo de las ΔH asociadas a procesos químicos (Barker y Millar, 1996).

Lejos de estos enfoques mecanicistas, según Arons (1999), toda propuesta de enseñanza sobre Termodinámica debe culminar en la conservación de la energía, pasando por tres etapas que muchas secuencias de enseñanza tradicionales no consideran relevantes:

- En primer lugar se define cuidadosamente el concepto de sistema. Puede parecer obvio que para estudiar la evolución que experimenta un sistema como consecuencia de un proceso, primero ha de definirse el sistema y declarar las variables de interés en el caso que se analiza; pero la literatura en Didáctica de las Ciencias ha puesto de manifiesto que los alumnos no tienen claro en muchos casos cuál es el sistema objeto de estudio (*Ideas alternativas sobre la naturaleza de las transferencias energéticas*, pág. 165).
- En segundo lugar, se introduce el concepto de estado de un sistema partiendo del análisis de los cambios que se producen en él.
- En tercer lugar, se establece la relación entre el cambio en el estado del sistema y la variación de energía, lo cual introduce el primer principio de la Termodinámica como un marco adecuado para combatir la identificación del calor y el trabajo como *formas de energía*. Mediante la ecuación matemática correspondiente se pone de manifiesto que el primer principio relaciona los cambios energéticos que suceden en el sistema con los procesos por los que tienen lugar dichos cambios ($\Delta E = q + w$). El segundo miembro de la ecuación representa aquellas interacciones del sistema que producen en él los cambios simbolizados en el primer miembro.

La complementariedad de las interpretaciones macroscópica y microscópica para la conservación de la energía y/o el primer principio de la Termodinámica se desarrolla en algo menos de un tercio de los libros analizados por Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más (2006). Si obvian esta integración de los dominios de representación de la materia, los textos escolares pierden una gran oportunidad de

dar un significado microscópico a los conceptos termodinámicos de calor, trabajo, energía interna y entalpía, y dificultan la construcción de un *corpus* de conocimiento coherente que proporciona distintas estrategias científicas con las que llegar a soluciones aceptables y razonadas. En algunos casos, se utiliza como recurso didáctico informar a los estudiantes sobre los problemas a los que se enfrentaron los científicos para llegar a los conocimientos actuales en el área (Martínez y Pérez, 1997), pero apenas se indica que estos conceptos y enunciados presentes se han modificado sustancialmente a lo largo de la historia aun cuando la estructura matemática apenas haya cambiado y por tradición se mantengan los mismos términos lingüísticos (Saltiel y Viennot, 1985).

A las recomendaciones de Arons, Cotignola *et al.* (2002) añaden una sugerencia: si se hace explícita la idea de que todos los sistemas tienen una cantidad de energía total *E* que es la suma de las contribuciones cinética, potencial e interna, se sientan las bases teóricas para construir la diferenciación conceptual del calor y la energía interna; más adelante se introducirá el concepto de entalpía. Por el contrario, Holman y Pilling (2004) proponen trabajar primero con la calorimetría a presión constante y la variación de entalpía antes de presentar la energía interna, que se relacionará después con el movimiento molecular y la energía de enlace. Desde nuestra perspectiva, estamos de acuerdo con los autores que siguen la línea de Gillespie (1997): antes de abordar el estudio de la Termodinámica Química, los alumnos deben manejar los modelos de partículas, enlace y reacción química para poder complementar la descripción macroscópica de la Termodinámica con la visión microscópica, más potente desde el punto de vista interpretativo. Los conceptos de energía interna, entalpía, entropía… se pueden definir en relación con los niveles de energía microscópicos del sistema (Carson y Watson, 1999), y también se pueden relacionar macroscópicamente a través del significado de las transferencias de energía, calor y trabajo del tipo $p \cdot V$.

Las aproximaciones a la energía interna se suelen basar en modelos macroscópicos, como hace el propio Levine (2002). En contra se pronuncian autores como Michinel y D'Alessandro (1994), Alonso y Finn (1995, 1996), Cárdenas y Ragout de Lozano (1996), o Reif (1999), quienes consideran que la definición historicista de *U* como una función de estado sin un modelo microscópico de referencia no ayuda a visualizar la relación entre la energía interna y la naturaleza material de los sistemas. En su lugar, proponen construir un modelo microscópico del sistema como un conjunto de partículas dotadas de sus propias energías cinética y potencial, que interaccionan y se transfieren energía entre ellas y al entorno inmediato. En España, Martínez y Pérez (1997) elaboraron una secuencia didáctica en la que se vinculan los conceptos de temperatura y energía interna a un modelo cinético molecular de la materia, y comprobaron que este enfoque ayudaba a los alumnos a superar paulatinamente la regla heurística de sentido común por la que tendían a centrar sus explicaciones en los cambios ignorando los estados del

sistema. Con esta superación se eliminan obstáculos al desarrollo de los procesos de construcción conceptual propios de la evolución hacia un pensamiento científico.

A medida que pasa el tiempo, se observa que los libros de texto van incorporando lentamente las ideas que derivan de la investigación en Didáctica de las Ciencias en el ámbito de la Termodinámica. Años después de los resultados de Michinel y D'Alessandro (1994), Cotignola *et al.* (2002) comprobaron si a lo largo de la última década había cambiado la situación de la Termoquímica en los textos escolares de uso frecuente en España, y concluyeron que la presentación del calor y la energía interna era más cuidadosa en cuanto a la perspectiva histórica y la diferenciación explícita del significado de ambos conceptos. Sin embargo, todavía encontraron términos y expresiones imprecisas o ambiguas, como "energía térmica", que se asocia indistintamente al calor o a la energía interna (Michinel y D'Alessandro, 1994; Cotignola *et al.*, 2002). Pocos años después, al analizar la presentación convencional de los contenidos conceptuales, epistemológicos y axiológicos relativos al primer principio de la Termodinámica y a los conceptos de energía interna y entalpía en el contexto termoquímico para los niveles educativos de segundo curso de Bachillerato y los primeros cursos universitarios, Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más (2006) encontraron que casi las tres cuartas partes de los libros de texto todavía no diferenciaba explícitamente calor y temperatura, y solamente en un 3,3% se manifestaba que la naturaleza de la energía no es sustancial (la energía no es una sustancia contenida en los cuerpos).

Aunque los libros de texto van aproximando sus definiciones de los conceptos termodinámicos al conocimiento científico actual, siguen sin salir al paso de las ideas alternativas de los alumnos (Solbes y Tarín, 1998) y de las dificultades epistemológicas a las que éstos se enfrentan cuando estudian los aspectos energéticos de los cambios físicos y químicos. Por ejemplo, el 70% de los libros escolares más habituales de 2º de Bachillerato y Universidad introduce el significado cualitativo de la energía interna, pero sólo el 40% lo pone en práctica para analizar al menos tres situaciones desde el punto de vista macroscópico. Solamente uno de treinta libros de texto tiene en cuenta posibles obstáculos epistemológicos de aprendizaje, como los razonamientos de sentido común (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más (2006).

Ya hemos comentado que muchos libros no utilizan más que ecuaciones matemáticas para definir, interpretar y procesar algunas magnitudes termodinámicas (Barlet y Mastrot, 2000; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002); si en la presentación de la energía interna ya se observa esta tendencia a la definición algorítmica, para la entalpía y la energía de Gibbs podemos afirmar que es mayoritaria. Como consecuencia, cuando los docentes guían el proceso de aprendizaje utilizando únicamente estos textos y las recomendaciones didácticas que los acompañan, los estudiantes no llegan a elaborar en el aula las definiciones científicas de los constructos en los que se pretende que basen sus interpretaciones

de los aspectos energéticos de los procesos naturales. En algunos libros se intenta suavizar esta presentación y, para que el alumnado no se desanime ante unas expresiones algebraicas que parecen no tener sentido, se recomienda el uso de algoritmos simples y reglas mnemotécnicas que ayuden a asimilar las ecuaciones (Ünal, Çalik, Ayas y Coll, 2006).

Autores como Wood y Battino (2001) reflexionan sobre la conveniencia de recordar a los profesores que aunque las magnitudes termodinámicas son en realidad funciones matemáticas, la comprensión conceptual debe preceder a la procedimental, y que la primera ("¿qué es la entalpía?", "¿qué es la entropía?"…) no debe desaparecer del aula una vez que se trabaje con los aspectos matemáticos.

En el caso de la entalpía, las definiciones mayoritarias son la operativa "calor a presión constante" (Barlet y Mastrot, 2000) y la expresión $U + PV$, que deriva del primer principio de la Termodinámica. Solamente un 20% de los libros incluye ideas cualitativas que aporten un significado más asequible para el alumnado, y casi las tres cuartas partes no especifican las limitaciones de aplicabilidad del concepto (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Más, 2006).

Algunas publicaciones incluyen sugerencias didácticas para evitar que el aprendizaje de la entalpía y la variación de entalpía se reduzca a la manipulación de datos numéricos. Por ejemplo, autores como Barker y Millar (2000) o Kind (2004a,b) proponen que el significado de la ley de Hess se apoye en la utilización de ciclos termoquímicos célebres en la historia de la Ciencia, como el ciclo de Born-Haber, cuya representación gráfica puede ayudar a interpretar los aspectos energéticos de los procesos químicos. Similares recursos visuales propone Hamilton (2003). Otros investigadores matizan que la elección de los ciclos de ecuaciones debe ser muy cuidadosa, porque de lo contrario los alumnos tendrán dificultades para aplicar de manera reflexiva sus conocimientos a fenómenos poco significativos para ellos o cuya base teórica (microscópica) no dominan (Sözbilir, 2004a). Así sucede, por ejemplo, con los cambios de estado, las disoluciones y las disociaciones químicas, procesos que para los estudiantes tienden a confundirse en uno solo, vago e indistinto. En todo caso, aunque las reacciones con las que se trabaje sean suficientemente conocidas para el alumnado, ha de recordarse que la ley de Hess es un artificio de cálculo, y que las operaciones se realizan sobre ecuaciones y no sobre reacciones; solamente la ecuación química global debe tomarse como representante simbólica de un proceso real ("literal"), mientras que las demás ecuaciones son meras "alegorías químicas" (Diemente, 1998).

Por su parte, Greenbowe y Meltzer (2003) son partidarios de que los contenidos relacionados con la variación de entalpía se desarrollen mediante la realización de actividades de laboratorio. Para ello proponen una experiencia calorimétrica sin reacción química (la disolución del hidróxido de sodio en agua) como un contexto sencillo para lograr más fácilmente una confrontación de las ideas

de los alumnos sobre el calor, la temperatura y las transferencias de energía. Este tipo de tareas ayuda a construir conocimientos procedimentales y conceptuales, tanto del dominio macroscópico como del microscópico, al facilitar la visualización de los cambios en el estado termodinámico de los sistemas y la sistematización de su estudio mediante las variables termodinámicas cuyas variaciones se asocian a hechos observables. Al mismo tiempo, se introducen modelos microscópicos para elaborar justificaciones sobre dichos cambios macroscópicos (Ben-Zvi *et al.*, 1993).

En la enseñanza convencional de la Termodinámica básica se tiende a trabajar solamente con sistemas del tipo combustible-oxígeno. Las nuevas propuestas encaminadas a construir conocimiento científico pueden incluir también actividades sobre la combustión (Ross, 1993; Kind, 2004a,b), con la finalidad de desarrollar los modelos de partículas, enlace y reacción química en el aula, además de combatir la concepción inadecuada de los combustibles y otro tipo de sustancias químicas como entidades que necesitan de un estímulo que las active para producir una reacción. Sin embargo, el uso excesivo de este tipo de procesos exotérmicos en las secuencias de actividades parece generar en los estudiantes una asociación implícita entre la liberación de energía y la formación de enlaces covalentes (Barker y Millar, 2000), sin que se favorezca la transferencia de los conocimientos termodinámicos a otro tipo de reacciones en las que se implican compuestos no covalentes. Ya hemos comentado que deben evitarse las analogías y expresiones lingüísticas que puedan reforzar las concepciones materialistas, como la frase "enlaces ricos en energía", que aparece en muchos libros de texto de Química y, sobre todo, de Biología (Johnstone *et al.*, 1979; Hofstein, 1983; Gayford, 1986; Cohen y Ben-Zvi, 1992; Storey, 1992).

Para aceptar los modelos energéticos microscópicos de la ciencia escolar, los estudiantes deben superar la concepción materialista de los enlaces químicos y visualizarlos como interacciones estables entre las partículas del sistema. Este modelo de enlace pone de manifiesto la contradicción entre dos ideas muy extendidas: que los átomos enlazados tienen menor energía que los átomos libres, y que los enlaces almacenan una gran cantidad de energía que se libera con la ruptura de la interacción (Boo, 1998; Teichert y Stacy, 2002). Si entre dos partículas existe un enlace químico es porque éstas han alcanzado un estado más estable que el que tenían por separado y, por tanto, para romper el enlace se requerirá aportar a las partículas suficiente energía como para superar la interacción. Entonces las partículas quedan libres y disponen de una cantidad de energía que se liberará cuando se establezca otra interacción. Así pues, la formación de interacciones solamente se produce cuando la energía de las partículas del sistema es tal que éstas pueden mantenerse en unas regiones del espacio caracterizadas por un entorno electrónico estable, con un nivel energético bajo o moderado. Establecida la interacción, la distribución energética anterior ya no es favorable, y una parte de la energía de las partículas se dispersa por el sistema; una fracción se libera al entorno.

No son pocos los investigadores que critican la utilidad didáctica de parte del léxico termoquímico (*Enfoques y metodologías en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 198) que tiene significados muy diferentes en el lenguaje científico y en el lenguaje cotidiano: energía, trabajo, calor, capacidad calorífica… Los autores que han explorado las dificultades de aprendizaje relacionadas con la influencia del lenguaje cotidiano (por ejemplo, McClelland, 1989) hacen hincapié en que estos problemas no se limitan a la Termoquímica; en Termodinámica Química se encuentran algunos términos lingüísticos de significado polémico: desorden, entropía, espontaneidad, irreversibilidad, *energía libre*… aunque algunos se utilizan relativamente poco en el lenguaje no científico y por lo general no figuran en el vocabulario de los alumnos de secundaria.

Todos estos vocablos han suscitado serios debates sobre su validez como descriptores de los conceptos científicos a los que dan nombre, y el inglés *driving force* no es una excepción. Se trata de una expresión muy frecuente en el mundo anglosajón (no así en nuestro entorno) que nombra en dos palabras la causa responsable de que los procesos sean espontáneos. Podríamos traducirla como "fuerza directriz [de los procesos]", y se considera inadecuada por dos razones:

En primer lugar, los dos términos que la componen proceden directamente de la Mecánica newtoniana, desde la cual no se puede explicar el sentido de los procesos naturales. En segundo lugar, la comunidad científica no dispone de un mecanismo determinista que explique la espontaneidad, sino que nos basamos en los postulados de la Mecánica Estadística. En este sentido, el término *driving force* no es científicamente adecuado. Además, parece que su utilización en la enseñanza puede reforzar en el alumnado la idea alternativa de que existe una fuerza física responsable de la evolución de los sistemas. Por todo ello, Craig (2005) y Kozliak (2006) recomiendan que se deje de llamar *driving force* a lo que podría denominarse sin mucha incomodidad "maximización de la entropía del universo" o incluso "degradación de la energía".

La relación entre la *driving force*, la degradación de la energía y la magnitud entropía ha sido objeto de bastante controversia en la literatura especializada (Lambert, 2002a; Lambert, 2002b). En la enseñanza convencional se tiende a enunciar el segundo principio de la Termodinámica desde el punto de vista macroscópico, relacionándolo con la entropía pero sin llegar a vincular explícitamente la variación entrópica del sistema con la degradación energética que se verifica en cualquier proceso termodinámico (Solbes y Tarín, 2008). En los cursos universitarios, cuando se ofrecen definiciones más precisas y rigurosas de la entropía y la energía de Gibbs, los alumnos solamente han trabajado con procesos ideales (que poco tienen que ver con sus experiencias personales), y tienen bastantes dificultades para aplicar las formulaciones teóricas del segundo principio a los procesos químicos reales (Williamson y Morikawa, 2002).

Desde la investigación se propone que los estudiantes de secundaria analicen los procesos termodinámicos sobre la base de las transferencias energéticas y de los cambios que éstas conllevan en la distribución de la energía del sistema. Así se justifica plenamente la asociación entre energía y cambio, que se inicia con la definición abierta de energía (Doménech *et al.*, 2003), se enriquece con las transferencias y la conservación energéticas, y se completa con la idea de degradación: como consecuencia de las interacciones, la energía se degrada u homogeneiza, es decir, se vuelve no útil (lo que elimina la paradoja de la "crisis energética"). Si se toma el ejemplo idealizado de un sistema aislado, se observa que éste evoluciona hacia configuraciones microscópicas más desordenadas, que son más probables y hacen que disminuya la posibilidad de posteriores transformaciones. En este punto se recomienda utilizar la variable entropía para representar la degradación de la energía (Bindel, 2004), y a partir de aquí, el segundo principio de la Termodinámica en sus versiones macroscópica (en relación con los conceptos de calor y trabajo), y luego microscópica, lo que podría incluir el estudio de los osciladores armónicos, los cuantos de energía y la interpretación probabilística (Mirone y Benedetti, 2001). Una vez el alumnado se haya familiarizado con la perspectiva microscópica de las transferencias energéticas, se hace más sencilla y útil la introducción de la energía de Gibbs para aplicar el segundo principio de la Termodinámica sin tener que analizar sistema y entorno ni indagar tan detenidamente en los pormenores microscópicos de los sistemas químicamente complejos.

Sin duda, la entropía es el concepto termodinámico que más discusiones ha generado en la literatura del área, tanto por su significado como por su utilidad en la enseñanza secundaria. Los puntos más conflictivos del debate se refieren a la utilización de la entropía para la estimación del desorden termodinámico de los sistemas materiales y de los grados de libertad de las partículas, así como su relación con la degradación de la energía.

En la enseñanza, al igual que en el seno de la comunidad científica, la entropía se suele definir como un índice de la medida de la aleatoriedad o el desorden termodinámico de un sistema (Lambert, 2002a; Lambert, 2002b; Williamson y Morikawa, 2002), lo cual parece generar una gran cantidad de ideas alternativas, debido a la polisemia de la palabra *desorden* en el lenguaje cotidiano y a las imprecisiones que se incluyen en los libros de texto cuando se ilustra el desorden termodinámico mediante metáforas macroscópicas. Algunos libros no hacen explícito qué entienden por "desorden", y las definiciones que aportan manuales y profesores varían de individuo a individuo (Sözbilir y Bennett, 2007). En los primeros cursos, la aplicación de la entropía al estudio de los procesos se justifica apelando a razonamientos de tipo cualitativo (Chang, 2011). Solamente las propuestas didácticas de nivel más avanzado introducen la definición estadística de la entropía en relación con el número de microestados permitidos para el sistema.

Desde la investigación en Didáctica de las Ciencias se aportan varias sugerencias para minimizar la problemática terminológica sobre el desorden:

Una posible solución pasaría por definir clara, rigurosa y consistentemente el desorden desde el punto de vista científico actual, ayudando a los alumnos a hacer explícitas las acepciones que dan al término y estableciendo un significado compartido acorde con las ideas de la ciencia escolar (Sözbilir y Bennett, 2007).

Otra alternativa, aceptada por un mayor número de autores, consiste en evitar la definición de la entropía como magnitud que mide el desorden de los sistemas (Candel Rosell, Satoca Valero y Soler Llopis, 1984; Lambert, 1999; Lambert, 2002a; Lambert, 2002b; Sözbilir y Bennett, 2007). La noción científica de desorden termodinámico excluye los modelos analógicos macroscópicos que se suelen utilizar en la enseñanza convencional, como el desorden espacial que se observa cuando caen al suelo las cartas de una baraja que se lanzaron al aire (Lambert, 1999). Ejemplos similares a los que recurren muchos profesores y programas televisivos de divulgación científica son el estado caótico en el que queda un dormitorio cuando se deja la ventana abierta un día de viento, o el terrible alboroto que se arma cuando corretea y brinca por el cuarto un personajillo de dibujos animados como el frenético *Demonio de Tasmania*. Mediante este tipo de analogías macroscópicas se hace difícil establecer la dependencia de la entropía con respecto a la temperatura, la cantidad de materia y la composición del sistema (Sözbilir y Bennett, 2007).

¿Se puede mantener el concepto de desorden termodinámico en las aulas y relacionarlo con la entropía? Según los autores que responden afirmativamente a esta pregunta, para que los alumnos lleguen a establecer una definición adecuada y reflexionen sobre las características de los sistemas y los cambios que éstos experimentan, se debe recurrir a los modelos de interacción entre partículas y llegar a la diferenciación explícita entre el desorden termodinámico y el desorden visual (espacial) de las partículas en el sistema (Kozliak, 2004; Sözbilir y Bennett, 2007).

Pero la mayoría de los autores que han explorado esta cuestión considera que es menos problemático definir la entropía desde la perspectiva termodinámica clásica, como el índice de dispersión energética (Lambert, 2002a; Bindel, 2004; Craig, 2005; Sözbilir y Bennett, 2007): la entropía del sistema se corresponde con la dispersión de la energía dentro del sistema, y la entropía del universo se refiere a la dispersión entre el sistema y su entorno. Después se construirá la interpretación microscópica de la degradación de la energía (Candel Rosell, Satoca Valero y Soler Llopis, 1984). Esto, además de ser menos confuso desde el punto de vista lingüístico, permite sentar una base cualitativa sobre la cual se presentarán la Mecánica Estadística y la Física Cuántica. Para visualizar desde una perspectiva macroscópica el significado de la entropía, se puede recurir a diferentes representaciones del dominio simbólico, como imágenes pictóricas de las partículas o pequeñas colecciones de gráficas *PV* en las que se comparan los cambios que experimenta un

sistema cuando sufre un proceso en distintas condiciones de presión y temperatura. Se han propuesto distintos recursos didácticos visuales para ilustrar estos aspectos (*Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen recursos visuales*, pág. 249).

Llegados a un nivel más avanzado, se puede introducir la idea de microestado energético para construir una perspectiva mecánico-estadística basada en la distribución de Boltzmann (Lambert, 2002b), que sirve como puente de unión entre el mundo macroscópico y el microscópico (Novak, 2003). Se introducen entonces las distribuciones energéticas que caracterizan a los microestados permitidos para el sistema (Kozliak, 2004). En este punto puede desarrollarse la concepción de la entropía del universo como criterio de espontaneidad (Williamson y Morikawa, 2002). Son pocos los autores que, como (Battino, 2007), defienden la omisión total de las perspectivas microscópicas mecánico-estadísticas y cuánticas, por considerarlas demasiado demandantes y abstractas para los alumnos. Según Battino, la mejor aproximación es la que parte de la vía experimental y guía la observación de los fenómenos con interpretaciones microscópicas más simples, "que valgan la pena". En una línea más simplificadora y menos rigurosa, Tomanek (1994) propone definir la entropía como "una ley física de la naturaleza" que explica los procesos de mezcla, la sucesión ecológica y la crisis energética.

Integrando la perspectiva macroscópica de la entropía, el modelo cinético molecular y los modelos de reacción química, se puede partir de la función entrópica y el segundo principio de la Termodinámica para llegar a las nociones de grado de extensión de un proceso químico, estado de equilibrio, grados de libertad de un sistema (Iyengar y deSouza, 2014), acoplamiento de reacciones químicas espontáneas y reacciones no espontáneas, cantidad de información emitida por una fuente (Candel Rosell, Satoca Valero y Soler Llopis, 1984), flechas del tiempo, la muerte térmica… (Bindel, 2004). Para Bindel (2000) y Craig, 2005, el concepto de entropía debe preceder en las propuestas de enseñanza al de energía de Gibbs, con la finalidad de elaborar una interpretación completa de la espontaneidad de los procesos naturales en función de las transferencias energéticas entre el sistema y el entorno. Qué profundidad de desarrollo sería deseable para las perspectivas cuántica y mecánico-estadística de la entropía y el segundo principio de la Termodinámica, no queda claro en la literatura del área. Esto no es de extrañar, si tenemos en cuenta las dificultades que ofrecen el tratamiento matemático y las múltiples interpretaciones físicas de estos constructos (Lieb e Yngvason, 1999, 2000; Left, 2012b,c,d,e).

El concepto de espontaneidad es quizá el que más interferencias tiene con los múltiples significados cotidianos (Ochs, 1996). Además, la comunidad científica no ha llegado a establecer claramente el significado técnico del vocablo, sino que tácitamente aceptó su difusión desde el siglo XIX y lo ha seguido utilizando durante más de cien años, matizándolo progresivamente a medida que la Termodinámica ampliaba sus dominios hacia el mundo microscópico. En resumen, a diferencia de

las palabras especializadas, que fueron escogidas de manera que se evitasen confusiones con el lenguaje cotidiano, "espontaneidad" no se ha definido como tal en el vocabulario técnico de las Ciencias pero que se utiliza en Termodinámica.

El concepto de espontaneidad no está incluido en el *curriculum* de la enseñanza secundaria de todos los países. Sin embargo, independientemente de que se introduzca en estos niveles o más adelante, las propuestas didácticas convencionales suelen ilustrarlo mediante modelos analógicos que lo relacionan con el *desorden* espacial de objetos macroscópicos. Sin embargo, algunos libros de texto ejemplifican la espontaneidad recurriendo a la distribución de las partículas de un gas ideal en una serie de cámaras interconectadas. Para Williamson y Morikawa (2002), este último modelo presenta la ventaja de que con él se puede ayudar a los alumnos a superar la idea alternativa de que el cambio espontáneo en un sistema se debe a la tendencia a minimizar la energía interna. Si se plantea el ejemplo de las cámaras interconectadas en un sistema aislado (idealizado), el estado inicial y el final del sistema tienen la misma cantidad de energía, y queda demostrado que el proceso es espontáneo no porque el sistema tienda a la minimización de su energía interna, sino a la maximización de su entropía (Williamson y Morikawa, 2002).

Las connotaciones cotidianas más extendidas del adjetivo espontáneo se refieren a la inmediatez o brevedad de un evento, o a su surgimiento a partir de un impulso momentáneo. También pueden relacionarse con la ausencia de restricciones obvias en la realización del proceso; por ejemplo, si la causa del evento se desconoce, es interna al sistema o es natural, entonces éste se considera espontáneo. Un tercer sentido posible se utiliza con profusión en los libros de texto: espontáneo es aquel proceso que sucede sin influencia o intervención externa.

Hasta aquí, los significados cotidianos de la espontaneidad. Pero ¿qué es para los libros de texto y los manuales científicos? Algunos evitan dar una definición completa y optan por la operativa, que establece como procesos espontáneos aquéllos caracterizados por una variación negativa de la energía de Gibbs: es decir, son espontáneos los procesos exergónicos. En otros textos se puntualiza la distinción entre una espontaneidad termodinámica (el proceso sucede) y una espontaneidad cinética, responsable de que éste se haga perceptible a causa de su velocidad. También hay casos en los que se consideran espontáneos aquellos procesos que están permitidos y demuestran un cierto grado de irreversibilidad. En este sentido, la variación de la entropía del sistema puede convertirse en un indicador de la irreversibilidad y/o de la espontaneidad de un proceso, dependiendo de la relación alternativa que se establezca *ad hoc* entre ambos conceptos (Ochs, 1996). Así pues, "espontáneo" es, según en qué textos científicos, un cambio que sucede, un cambio que se percibe, un cambio que está permitido, un cambio que tiene lugar sin injerencia externa, o un cambio irreversible. En el ámbito de la Biología y la Bioquímica, muchos libros definen que los procesos espontáneos son aquéllos que tienen lugar sin concurso de la actividad enzimática.

A la vista de todas las interferencias terminológicas y de las dificultades de aprendizaje que se han observado en los estudiantes de enseñanza secundaria y universitaria, hay autores que optan por eliminar el término espontaneidad de la lexicografía científica y sustituirlo por otro (Ribeiro, Pereira y Maskill, 1990; Ochs, 1996), como "exergónico"; pero recordemos que una variación negativa de la energía de Gibbs solamente sirve como indicador de espontaneidad para aquellos procesos que tienen lugar en condiciones de temperatura y presión constantes. Con la sutitución de un término por otro se pueden eliminar parte de las ideas alternativas sobre un determinado concepto científico; pero no olvidemos que el conocimiento se puede construir aun con una terminología sin estandarizar. Por ejemplo, Helmholtz llamaba a la entropía *Unordnung*, esto es, desorden, y Gibbs, *mixed-up-ness*, lo que podríamos traducir como grado de mezcla; y estas denominaciones no impidieron que ambos científicos sentaran las bases de nuevas funciones de estado relacionadas con la entropía de los sistemas (Lambert, 2002b).

No se ha planteado la sustitución léxica para la irreversibilidad, aunque desde la literatura del área se insiste en que esta palabra tampoco está exenta de ambigüedad (Mirone y Benedetti, 2001). Los libros de texto de enseñanza secundaria la definen como la imposibilidad de que un proceso cambie de sentido, mientras que en la enseñanza universitaria se prefiere una aproximación cinemática, sin entrar en el análisis de sus causas (Duprez, Méheut y Kermen, 2004).

Para ilustrar el concepto de reversibilidad, los libros de Fisicoquímica utilizan ejemplos que son poco significativos para los alumnos no familiarizados con la Física avanzada o la Ingeniería. Los ejemplos preferidos son distintas máquinas térmicas ideales que operan en ciclos de Carnot (Atkins, 1999). Según (Williamson y Morikawa, 2002), en la enseñanza secundaria de la Química sería más conveniente recurrir a procesos químicos con los que los estudiantes ya hayan trabajado en cursos anteriores.

En cuanto a las recomendaciones de los investigadores para la introducción de la energía de Gibbs en la enseñanza secundaria, se observa un acuerdo generalizado en proponer que el significado de este concepto se construya sobre el de entropía y el segundo principio de la Termodinámica (Bindel, 2004; Craig, 2005). También hay algún comentario sobre la cuestión terminológica: en los libros de texto y en los manuales científicos, la energía de Gibbs recibe nombres tan diversos como capacidad para realizar trabajo (Ogborn, 1986), energía disponible (*fuel value* o *available energy*, según Ross (1993) o exergía, lo que le da el significado de "motor" de los procesos (Ogborn, 1986). Pero su denominación más extendida es sin duda el de *energía libre* (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a; Craig, 2005), que aparece tanto en el ámbito académico como en el científico, e incluso en numerosas publicaciones de Didáctica de las Ciencias. Casi ninguno de los libros de texto y documentos institucionales la llama función de Gibbs; este nombre solamente se utiliza en el seno de la comunidad científica. El adjetivo "libre" se refiere a la

cantidad de energía que se transfiere sin disipación por calor, o lo que es lo mismo, a la energía que se invierte en procesos de trabajo útil, que no sea del tipo PV (Craig, 2005). Mientras un sistema sigue disponiendo de *energía libre* que poner en juego, continúa experimentando los procesos que sean favorables en esas condiciones (Johnstone, MacDonald y Webb, 1977a). En este sentido, como la energía de Gibbs es una magnitud relacionada con los grados de libertad de un sistema, puede atribuírsele el adjetivo "libre", pero en rigor G solamente cuantifica la energía "libre" si la transformación se verifica a temperatura y presión constantes (Craig, 2005). Por este motivo se recomienda no aplicarle el adjetivo "libre", y más teniendo en cuenta que aporta un significado semejante, hasta cierto punto, al que los alumnos otorgan a la energía total del sistema (Ross, 1988). A este respecto, Ross (1988) llega a proponer que la palabra *energía* se sustituya en la enseñanza por la palabra combustible (*fuel*), porque «los combustibles tienen energía libre que podemos utilizar para hacer cambiar los sistemas.»

Pero en los libros de texto de la enseñanza secundaria la energía de Gibbs raras veces llega a ser más que un valor numérico a despejar en la ecuación fundamental de la Termodinámica, porque los enfoques tradicionales hacen tanto hincapié en los aspectos cuantitativos que el significado científico de G ni siquiera se enuncia (Sözbilir, 2002). Por su alto nivel de abstracción, autores como Battino (2007) recomiendan no presentar la función de Gibbs al alumnado, y en su lugar dar a la entropía el valor de un descriptor de los fenómenos que indica en qué dirección suceden los cambios. Si se utilizan la ley de acción de masas y una aproximación empírica al equilibrio químico, no es necesario acudir a la función de Gibbs para predecir el sentido de los procesos, y el tiempo que habitualmente se dedica a construir el concepto de G podría emplearse en la enseñanza de las propiedades y la reactividad de las sustancias químicas (Battino, 2007).

En cuanto a la ecuación fundamental de la Termodinámica, la mayoría de los libros de texto se limita a enunciarla como la receta matemática para predecir la espontaneidad de los procesos. Algunos intentan sistematizar su aplicación vinculando los términos ΔH y $-T\cdot\Delta S$, respectivamente, a la exotermia/endotermia y a la variación del grado de desorden del sistema. En general, se enuncia que las contribuciones negativa para ΔH y positiva para $-T\cdot\Delta S$ son "favorables" a la espontaneidad, sin indicar por qué ni en qué condiciones lo son (Pintó Casulleras, 1991) y sin desarrollar un significado más profundo sobre el balance global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno (Banerjee, 1995) ni prestar atención a las dificultades de tipo matemático relacionadas con el signo negativo del segundo término. Con la ayuda de un diagrama de energías pueden superarse estos obstáculos (Teichert y Stacy, 2002).

Estas confusiones y por lo general todas las ideas alternativas en Termodinámica se amplifican si los profesores las refuerzan utilizando un lenguaje

inadecuado (Driver y Warrington, 1985; McClelland, 1989; Ribeiro, 1992; Beall, 1994; Banerjee, 1995; Sözbilir y Bennett, 2007), que en algunas ocasiones se debe a hábitos lingüísticos inconvenientes y en otras revela que los docentes también sostienen ideas alternativas en Termodinámica (Banerjee, 1995; Barker y Millar, 2000; Kruger *et al.*, 2002; Bañas, Mellado y Ruiz, 2004), como la recurrente concepción materialista de la energía (Schmid, 1982; Falk *et al.*, 1983; Duit, 1987), o la identificación de los conceptos de energía y fuerza, que sostienen casi las tres cuartas partes de los maestros de primaria (Kruger *et al.*, 2002). En el caso de la identificación entre calor y energía interna, solamente un 20% de los profesores en activo establece explícitamente la diferencia (Doménech *et al.*, 2013). La formación inicial y permanente del profesorado y la iniciativa innovadora docente en Didáctica de las Ciencias son todavía materias en las que queda mucho por hacer, pero ésta no es una tarea imposible.

Ya hemos visto que los docentes deben enseñar a hablar Ciencia a los que aprenden (Lemke, 1997), lo que incluye utilizar adecuadamente la terminología científica. Enseñar el lenguaje de la Ciencia se hace especialmente difícil si los profesores no miden las expresiones que utilizan en el aula, y en Termodinámica los problemas crecen por la abundancia de términos tradicionales y poco sistemáticos (calor, energía, espontaneidad, desorden, irreversibilidad…) Además, parece que el tema de Termodinámica es uno de los que más inercia didáctica acusan en los libros de texto (Strube, 1988; Stylianidou y Ogborn, 1999; Cotignola *et al.*, 2002), tanto en las definiciones anticuadas como en las concepciones obsoletas implícitas. Por todas estas razones, en Termodinámica se hace muy necesario ayudar a los estudiantes a adecuar los significados y la forma de su discurso a los distintos contextos en los que hagan valer sus conocimientos (Ribeiro, 1992; Sözbilir, 2007).

Es muy difícil cuidar en todo momento el discurso (Millar, 2005), y los libros de texto no son los únicos que recogen términos que hoy se consideran inadecuados: también algunos libros técnicos, enciclopedias y manuales científicos de difusión internacional contienen errores de este estilo. Incluso en los libros científicos más completos podemos encontrar ejemplos aislados de expresiones que la Ciencia actual ve poco recomendables. Por lo general las definiciones de los conceptos y los enunciados son muy cuidadosas y precisas, pero en los pasajes descriptivos a veces se cometen algunos descuidos en la redacción. Por ejemplo, en el famoso *Physical Chemistry* de Levine (Levine, 2002; pp 44, 70, 98 en la edición neoyorkina) podemos leer que el calor pasa "fluyendo de un cuerpo a otro". En cambio, el autor detalla en profundidad y sin indecisión el significado y las interpretaciones macro y microscópicas de conceptos tan abstractos como la entropía, y hace explícita la polémica sobre el término "desorden". En Buckingham (1996) podemos leer que la escala absoluta de temperatura se mide en "grados Kelvin". La antigua denominación de "energía libre" para la energía de Gibbs aparece repetidamente en la literatura de Didáctica de las Ciencias (Campbell, 1979; Barrow, 1988; Beall, 1994;

Banerjee, 1995; Boo, 1998; Carson y Watson, 1999, 2002; Sözbilir, 2002, 2004; Teichert y Stacy, 2002; Greenbowe y Meltzer, 2003; Pintó, 2004…) Incluso en el artículo de Quílez (2009), que analiza los errores que presentan los libros de texto universitarios de química general al tratar la energía de Gibbs y las distintas contribuciones a la variación de energía de Gibbs total del sistema y, en particular, la contribución referida al avance de la reacción…, se utiliza la expresión "energía libre de Gibbs".

En ocasiones, los cuerpos de texto son muy esmerados con la teminología, pero las baterías de cuestiones teóricas y prácticas que se incluyen al final de los capítulos no están tan revisadas y contienen expresiones consistentes con visiones materialistas de la energía o el calor, como "¿Cuántos Julios de calor se han absorbido?", "¿Qué cantidad de calor se libera?" (Doige, 2012).

Debe tenerse en cuenta, además, que en la vida cotidiana y desde fuentes de prestigio social, como los medios de comunicación de masas, se divulgan bastantes expresiones que no concuerdan con el lenguaje científico. Casi todas están relacionadas con la energía, el calor y el trabajo, y muchas tienen una notable relevancia social, política y económica: "gastar energía", "ahorrar energía", "desperdiciar energía", "usar energía"… (Watts, 1983; Duit, 1987). La persistencia de los significados coloquiales demuestra que las ideas de los estudiantes están en buena medida influenciadas por la cultura no científica o poco científica (Duit, 1987), y estas expresiones entran en el aula de Ciencias como parte del bagaje de conocimientos del alumnado. El hecho de que ofrezcan tanta resistencia al cambio terminológico es un reflejo de la dificultad del cambio conceptual (Trumper, 1990b) y del elevado *status* que otorgan los alumnos a los usos socialmente extendidos de las palabras (Solomon, 1983a,b).

En el apartado en el que comentábamos la componente social del aprendizaje y la utilización didáctica de las prácticas discursivas en el aula (*Componente social del aprendizaje*, pág. 51), nos apoyamos en los resultados de la investigación en Didáctica de las Ciencias para plantear la necesidad de dejar entrar el lenguaje cotidiano en el aula como una ayuda al desarrollo de las destrezas de razonamiento y argumentación. Desde la literatura de investigación en Termodinámica, varios autores afirman esta necesidad de no silenciar ni extinguir en el aula de Ciencias los significados cotidianos, que son esenciales en la comunicación social. Conviene establecer explícitamente las semejanzas y diferencias entre el lenguaje cotidiano y el científico para que los que aprenden se comuniquen de manera efectiva y adecuada en los distintos contextos (Solomon, 1983a,b; Duit, 1987; Trumper, 1990b; Duit y Häussler 1994). Se trata de que los alumnos puedan «pensar en dos dominios de conocimientos diferentes y que sean capaces de distinguir entre ambos» (Solomon, 1983a).

Además, recordemos que en Termodinámica algunos conceptos no han adquirido aún un significado suficientemente preciso o común a las distintas áreas

(Pushkin, 1997): la energía, el calor… (Gayford, 1986; Barak, Gorodetsky y Chipman, 1997; Galley, 2004; Doige y Day, 2012; Lancor, 2014). La situación en las aulas se complica si los docentes no alcanzan un consenso sobre la naturaleza de estos conceptos (Beynon, 1990; Kruger, 1990). Esto crea más confusión en los estudiantes, que tienden a adaptar su discurso *ad hoc* a las distintas situaciones sin llegar crear un vocabulario coherente ni un cuerpo completo de relaciones entre la energía y los demás conceptos relacionados con ella (Goldring y Osborne, 1994). Y se añaden más dificultades si los profesores subestiman las capacidades de los alumnos para aprender a utilizar el lenguaje de la Ciencia y los conceptos termodinámicos (Sözbilir, 2002). Por ejemplo, en la investigación de Stylianidou y Ogborn (1999) se pidió a futuros profesores de enseñanza secundaria de Inglaterra y Gales que reflexionaran sobre dos innovaciones didácticas diferentes, que eran la sustitución de la expresión "transformación de energía" por "transferencia de energía" (tal como se recogía en las recomendaciones del *curriculum* de 1989), y la utilización de nuevos materiales didácticos sobre la conservación y degradación de la energía, el segundo principio de la Termodinámica y la espontaneidad. Los futuros docentes incorporaron a su vocabulario la nueva terminología sin dejar de utilizar la anterior (para parte de ellos ambas expresiones son sinónimas). Opinaron que los nuevos materiales resultaban útiles para trabajar el tema de Termodinámica con los alumnos de los niveles avanzados de secundaria; en cambio, rechazaban su implementación para los más jóvenes por considerar que la intervención sería muy arriesgada o imposible de realizar. No es poco frecuente que los profesores subestimen las capacidades de sus alumnos para aprender Ciencia, y en Termodinámica esta tendencia a rebajar las expectativas de aprendizaje se extiende también sobre los estudiantes que se hallan en los niveles superiores de la enseñanza secundaria (Sözbilir, 2002).

Para poner a disposición de los docentes nuevas propuestas y materiales de enseñanza que ayuden a los alumnos a hacer evolucionar sus ideas sobre Termoquímica y Termodinámica Química hacia las de la ciencia escolar, se han diseñado y evaluado distintas actividades y secuencias de actividades que incorporan los resultados de la investigación en Didáctica de las Ciencias. Pasamos a resumirlas en el siguiente apartado.

Propuestas didácticas y materiales de aprendizaje publicados en el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos

Se revisan las propuestas y materiales de enseñanza que se han divulgado hasta la fecha, desde las unidades didácticas completas que incluyen secuencias de actividades novedosas, hasta aquellas publicaciones que se centran en el diseño de una o algunas actividades puntuales. Ya se ha evaluado la efectividad de varias de estas aportaciones en la generación de aprendizaje; otras, en cambio, no se han testado todavía en un aula de Ciencias.

Ya hemos comentado que la mayoría de las propuestas de enseñanza centradas en la Termodinámica básica apenas salen del ámbito de la Física (*Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 202). De las pocas que se encuadran en el ámbito de la Biología, casi todas las recomendaciones y unidades didácticas se limitan al estudio de procesos concretos como la fotosíntesis, la respiración, la alimentación (ver Duit y Häussler, 1994) o los procesos ecológicos (Tomanek, 1994).

Algunas de las innovaciones que proceden de la Física son bastante interesantes para el fundamento teórico de esta investigación, porque se trata de propuestas unificadoras que convierten el concepto de energía y sus aspectos de conservación, degradación, transformación y transferencia (ver Duit y Häussler, 1994) en un eje vertebrador de las distintas ramas de la Ciencia (Hierrezuelo Moreno y Molina González, 1990; Doménech, Doménech y Martínez, 1993; Martínez y Pérez, 1997; Varela *et al.*, 1997; Reif, 1999; Solbes y Tarín, 2004; Pérez-Landazábal y Varela-Nieto, 2006; Hecht, 2007; Solbes y Tarín, 2008; Solbes, Guisasola y Tarín, 2009). Presentan una perspectiva moderna e integradora de la Física que entronca directamente con la Química y las Ciencias de la Tierra, y contienen recomendaciones útiles sobre el efecto de las innovaciones didácticas en el aprendizaje y sobre la implicación de las componentes cognitiva, social y contextual en la evolución de los conocimientos iniciales hacia los de la ciencia escolar, teniendo en cuenta que mediante la enseñanza de la Termodinámica se pretende transformar el paradigma físico de los alumnos (que hasta cierto punto tiene semejanzas con el aristotélico-escolástico) en el paradigma de la Física Clásica actual, según el cual la materia es capaz de interaccionar en virtud de ciertas propiedades como la masa o la carga, y como consecuencia puede experimentar ciertas transformaciones que se describen mediante el uso de magnitudes que se rigen por una serie de principios básicos (Sánchez Mambrilla, 1983b). Dado que las perspectivas innovadoras de estas propuestas suponen un cambio radical con respecto a la enseñanza tradicional de la Termodinámica, consideramos que sus enfoques y aproximaciones didácticas van mucho más allá de la presentación de nuevos materiales de enseñanza, y por este motivo ya las hemos comentado en el apartado anterior como auténticas bases teóricas (y prácticas) de una revisión sustancial de las estrategias y los materiales didácticos.

La conclusión más relevante que se ha extraído de la implementación y evaluación de las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química, es que la instrucción tiene pocos efectos significativos sobre las concepciones de los alumnos. Esta conclusión constituye un patrón reiterado en la literatura del área, y el ámbito de la Termodinámica no es una excepción a este respecto (Lang da Silveira y Moreira, 1996). Una posible causa de la escasa eficacia de la instrucción parece estar en el poco tiempo de que se dispone para desarrollar una construcción firme y significativa de los conocimientos científicos, sobre todo en

los niveles superiores de la enseñanza preuniversitaria (Martínez y Pérez (1997). Como ejemplo, citaremos la investigación de Martínez y Pérez (1997), en la cual se evaluó la implementación de una propuesta de enseñanza sobre temperatura, calor y energía interna para alumnos de secundaria y Universidad. A lo largo de la intervención, los estudiantes acercaron sus conocimientos a los de la ciencia escolar en algunos aspectos, pero en general no desarrollaron destrezas en la operacionalización de las concepciones científicas. Demostraron una paulatina superación de la regla heurística de sentido común por la que se deben explicar los cambios y no los estados; sin embargo, el concepto de energía interna no se afianzó como función de estado del sistema. Con la introducción del modelo cinético molecular se logró que establecieran una conexión entre la temperatura y la energía interna a través de la energía cinética de las partículas, pero al mismo tiempo que se observaba una creciente diferenciación de las ideas de calor y temperatura, se produjeron algunos intentos de volver a vincular ambas nociones a través del movimiento de las partículas. Los investigadores relacionan estas dificultades con la falta de tiempo para afianzar los nuevos conocimientos. Otros autores que han trabajado en el diseño e implementación de propuestas de enseñanza en Termodinámica insisten en que para que se produzca la plena apropiación conceptual y procedimental es necesario ir más allá del simple manejo operativo de los nuevos conocimientos: el alumnado ha de utilizarlos reiteradamente en una variedad de situaciones, y las actividades deben poner un énfasis especial en la síntesis y conexión de los conocimientos nuevos con otros ya trabajados (por ejemplo, Doménech *et al.* (2003). Si se trabajan de manera explícita las relaciones Ciencia/ Tecnología/ Sociedad/Ambiente, se construye un cuerpo coherente de conocimientos científicos, se rompe con los planteamientos excesivamente académicos y se refuerza el interés por las tareas presentes y por ulteriores estudios (radiación, campos, relatividad…); además, se pone de manifiesto la necesidad de tomar decisiones personales y sociales sobre la situación energética mundial.

Pero el desarrollo de todos estos aspectos en el aula requiere tiempo y un notable esfuerzo intelectual por parte de profesores y alumnos, y no resulta fácil obtener unos márgenes adecuados de estos recursos en 2º de Bachillerato, donde la temporalización y los contenidos vienen determinados por las condiciones de las pruebas de acceso a la Universidad. No es de extrañar, pues, que para 2º de Bachillerato apenas se hayan publicado propuestas de enseñanza en Termodinámica, ni en el ámbito físico ni en el químico.

Sin embargo, también se observa una baja eficacia didáctica en propuestas cuyo desarrollo temporal fue desahogado. Por ejemplo, la implementación del proyecto *Salters Advanced Course* (Barker y Millar, 2000), para alumnos de 16 años, duró veinte meses a lo largo de los cuales se llevaron al aula varias unidades didácticas en las que se utilizaba una aproximación basada en el contexto. La unidad sobre Termoquímica ocupó tres meses de la intervención en el aula. En el

post-test que se realizó después de finalizada la parte experimental del proyecto, se observó que un tercio de los estudiantes no interpretó adecuadamente una reacción sencilla desde el punto de vista de la ruptura y formación de enlaces.

A continuación pasamos a resumir las principales características de las propuestas y materiales de enseñanza que se han publicado para los temas de Termoquímica y Termodinámica Química.

En primer lugar, destacaremos que menos de la quinta parte de las propuestas de enseñanza abarca tanto la Termoquímica como la Termodinámica Química, y muchas se centran en la enseñanza y aprendizaje de un aspecto teórico, una magnitud termodinámica o un principio concretos. Por ejemplo, Ben-Zvi *et al.* (1993) elaboraron actividades para introducir el tema de Termodinámica a partir de la noción de equilibrio térmico. Prácticamente todas las propuestas se han diseñado para ser implementadas dentro del orden de desarrollo de ciertos contenidos (*Metodologías y aproximaciones didácticas propuestas por la investigación en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 202). Pero hay una excepción a esta tendencia:

Ross (1988), siguiendo a Solomon (1982), considera que "el segundo principio viene primero", en el sentido de que está más de acuerdo con nuestra experiencia cotidiana que el primer principio de la Termodinámica. Por este motivo, proponen que se invierta el orden en el que se trabaja con estos conceptos en el aula.

La segunda excepción tiene por autor a Millar (2005), quien sugiere comenzar la enseñanza de la Termodinámica analizando los recursos energéticos (incluidos los combustibles y los alimentos), y generar un modelo de flujo de energía que sirva para introducir la noción de transferencia energética. Dado que este modelo convierte la energía en una sustancia *quasi*-material, habría que considerarlo un modelo "intermedio" que después se debería hacer evolucionar hacia el de la ciencia escolar. Para ello, Millar (2005) quiere llevar la noción de energía al contexto de las reacciones químicas y plantear los sistemas combustible/oxígeno como un medio para que los estudiantes asocien la energía con la combinación de sustancias químicas. Como ya hemos indicado (*Las interacciones químicas*, pág. 139), consideramos que las visiones materialistas de la energía no son eficaces si lo que se pretende es ayudar al alumnado a construir los conocimientos científicos, porque se generan interpretaciones alternativas cuya categoría ontológica es inadecuada, y esto obliga a los que aprenden a realizar un cambio conceptual radical y, por tanto, más difícil (Chi, 1992; Vosniadou, 1994).

Sobre el concepto de energía y sus propiedades generales, encontramos algunas propuestas de enseñanza interesantes, aunque casi todas se limitan a la materia de Física, como las que han elaborado Hierrezuelo Moreno y Molina González, 1990 y Guruceaga Zubillaga y González García (2011) para la ESO, o la de Pontes Pedrajas (2000) para COU (actual 2º de Bachillerato). Todas ellas se encaminan a la construcción de la noción de energía y su diferenciación conceptual

con respecto a la fuerza y el trabajo, aunque hacen un tratamiento globalizado de estos conceptos que no restringe su aplicación a los contextos mecánicos. Destacaremos que la más reciente (Guruceaga Zubillaga y González García (2011) está fundamentada en el marco teórico de Ausubel y Novak y enfatiza en la utilización de los mapas conceptuales como instrumento facilitador de un aprendizaje significativo.

Son muy pocas las unidades didácticas que integran conocimientos de la Física, la Química y la Biología, como la de Lee y Liu (2009), en la que se parte de las transferencias y las transformaciones energéticas para relacionar la conservación de la energía con un aumento del desorden termodinámico (entropía), y se relacionan todos estos aspectos teóricos con la dinámica de los sistemas vivos y del planeta Tierra. Esta propuesta de Lee y Liu (2009) se adscribe a la reciente línea de investigación sobre las progresiones de aprendizaje (*learning progressions*), como la de Neumann *et al.* (2013), o la investigación de Wolfson *et al.* (2014), en la que se exploró qué conceptos relacionados con la energía utilizan los alumnos en el ámbito de la Bioquímica.

Otras dos investigaciones en las que se diseñan y/o aplican materiales para la enseñanza de la Termodinámica desde la Biología y ciencias afines son las de Tomanek (1994) y Ben-Zvi (1999):

La primera (Tomanek (1994) se testó en la enseñanza secundaria de los EEUU, en la materia de Ciencias del Medioambiente, y con ella se pretende hacer ver al alumnado la necesidad de disminuir el consumo energético y de recursos naturales para no acelerar la degradación del planeta. Partiendo de la idea de que como consecuencia de la vida se producen residuos y contaminación, y de la "ley natural" por la cual la materia tiende al desorden, se llega a la noción de "consumo de la energía" como un proceso necesario para mantener la vida humana. Mediante la introducción del concepto de entropía se expresa que la vida acelera la natural desordenación de la materia, y se llega a la conclusión de que la eficiencia energética prolonga la vida útil de los recursos naturales.

La segunda de las propuestas más relacionadas con la Biología es la de Ben-Zvi (1999), diseñada para alumnos de la enseñanza secundaria de Israel que no cursaban un itinerario científico. El objetivo principal de esta propuesta es desarrollar una noción intuitiva de la energía de Gibbs (la energía que se puede transferir por trabajo útil), y presentar el acoplamiento energético de reacciones como el mecanismo por el cual algunas promueven otras que por sí solas no podrían tener lugar en las condiciones en las que sí se producen al acoplarse. Para poder llegar a este punto, la secuencia de actividades comienza con un repaso de la conservación de la energía y su aplicación a contextos cotidianos como el transporte o la dieta. Se discuten aspectos de relevancia sociocientífica y económica, como las relaciones entre el bienestar de una sociedad, la cantidad de energía disponible para

uso humano y la necesidad de preservar los recursos energéticos. Después, utilizando ejemplos de la vida diaria, como la tala de un árbol o la utilización de poleas para levantar y depositar objetos de gran masa, se define la espontaneidad de los procesos. A la hora de estudiar las reacciones químicas y biológicas, se introducen los modelos de enlace y reacción química, mediante los cuales se justifican los intercambios energéticos entre un sistema y su entorno. El concepto de acoplamiento entre procesos espontáneos y no espontáneos se aplica al caso del ATP, que los alumnos ya conocen de sus estudios de Biología.

En el ámbito de la Química, destaca una propuesta de enseñanza completa para el aprendizaje de la Termoquímica y la Termodinámica Química en la Universidad (Teichert y Stacy, 2002). En esta propuesta se incluyeron dos unidades didácticas en las cuales los alumnos trabajaron con los modelos de enlace y reacción química. Una de las unidades trataba sobre la energía de enlace, y la otra sobre la espontaneidad de los procesos químicos. La efectividad de la propuesta se comparó estadísticamente con el aprendizaje que realizaron los alumnos de un grupo de control que habían recibido una instrucción tradicional, y las principales diferencias entre el grupo experimental y el de control se relacionaron con la introducción de los modelos del dominio microscópico: los alumnos que trabajaron con la propuesta innovadora demostraron aplicar mejor sus conocimientos a situaciones nuevas, como la comprensión de un texto sobre las reacciones bioquímicas.

Otras propuestas didácticas bastante completas para el nivel universitario son las de Holman y Pilling (2004) y Belt *et al.* (2005), que diseñaron aproximaciones basadas en el contexto (*context-based*). La unidad didáctica de Belt *et al.* (2005) consiste en la resolución de un único problema abierto a lo largo de ocho sesiones de clase: se pide a los alumnos que decidan cuáles son las fuentes y recursos de energía preferibles para abastecer energéticamente a una ciudad imaginaria, de nombre Los Verdes, ubicada en el sudoeste de los EEUU. En cada sesión se analiza desde el punto de vista termodinámico una fuente de energía distinta, y entre las ocho sesiones se cubren las ventajas y desventajas de los combustibles fósiles, el hidrógeno y las energías solar y geotérmica. Por su parte, la unidad didáctica de Holman y Pilling (2004) desarrolla varias actividades con tareas en las que se utilizan recursos virtuales. Los contextos tratados van desde lo personal (valor energético de los alimentos) hasta lo social, lo medioambiental (impacto de los combustibles en el entorno natural), tecnológico (*airbags* de los automóviles) e investigador (como el "motor" molecular actina–miosina).

Para los niveles de enseñanza preuniversitarios no encontramos ninguna propuesta de enseñanza completa dedicada a la Termoquímica ni a la Termodinámica Química.

En cuanto al perfil de las actividades que se observan en la literatura, se han diseñado algunas que son sencillas y poco demandantes conceptualmente, como

reglas mnemotécnicas para ayudar a memorizar las relaciones entre las variables termodinámicas básicas y las principales (Rodríguez y Brainard, 1989), o adivinanzas, crucigramas, sopas de letras, paradojas (Bartell, 2001b), anécdotas históricas (Bartell, 2001a) y otros entretenimientos para repasar las definiciones de los conceptos termodinámicos (Boyd (2007). Pero también se han planteado actividades que desarrollan relaciones muy abstractas y requieren un alto grado de concentración y reflexión por parte del alumnado. Sobre todo, encontramos prácticas de laboratorio y actividades que proponen situaciones abiertas, y muchas reflejan la utilización de modelos y analogías, o de recursos visuales o informáticos. También se han publicado tareas basadas en textos didácticos en los que se tratan las conexiones de la entropía con la teoría de la información de Shannon (ver De Iyengar y deSouza, 2014), diágolos de tipo socrático para explicar el significado microscópico de la entropía y su ámbito de validez como indicador de la espontaneidad (Lowe, 1988), y ejemplos de la utilización de explicaciones batígenas (que apelan a los mecanismos profundos de los fenómenos) como recurso didáctico para construir razonamientos justificativos complejos (Cárdenas y Ragout de Lozano, 1996), como puede ser la aplicación del modelo cinético molecular para justificar las leyes que describen el comportamiento de los gases ideales.

Las propuestas de enseñanza que revisamos a continuación son las que se relacionan con los cinco aspectos citados anteriormente: aquéllas que incluyen actividades problemáticas (*Propuestas y materiales de aprendizaje con actividades problemáticas*, pág. 238), prácticas de laboratorio (*Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen actividades de laboratorio*, pág. 241), la utilización de modelos y analogías para la enseñanza de la Termoquímica y la Termodinámica Química (*Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen la utilización de modelos y analogías en la enseñanza de la Termodinámica*, pág. 244), la utilización de recursos visuales de diversos tipos (*Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen recursos visuales*, pág. 249) y la utilización de recursos informáticos (*Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen recursos de la enseñanza asistida por ordenador*, pág. 251).

Propuestas y materiales de aprendizaje con actividades problemáticas

Algunas de las propuestas de enseñanza que se han publicado están diseñadas para su implementación en los niveles universitarios, y por la complejidad de sus contenidos resulta difícil llevarlas a las aulas de secundaria, como sucede con la aportación de Melgarejo, Tito y Cappannini (1996) para la enseñanza de la termodinámica del no-equilibrio, la aproximación relativista al primier principio de Güémez (2011), o la de Banerjee (1995) para articular Termodinámica Química y Equilibrio Químico. Encontramos también una propuesta para desarrollar en un Máster de profesorado (Cervantes Madrid, Perales Palacios y Vílchez González, 2012), con el objetivo de facilitar a los futuros profesores tanto el aprendizaje de la Termodinámica como la disposición de diversos recursos didácticos para su intervención. En esta propuesta, las secuencias

de contenido se desarrollan por medio de mapas conceptuales, lo que ayuda a los futuros docentes a organizar jerárquicamente los conceptos y procesos, a preparar su intervención, a diseñar las estrategias de enseñanza y aprendizaje y a realizar la evaluación del aprendizaje generado. En otra propuesta (Flores Almazán y Trejo, 2003) también se hace uso de los mapas conceptuales, así como de la V de Gowin y de instrumentos para realizar una evaluación formativa durante el proceso de enseñanza y aprendizaje y una evaluación final sumativa de los aprendizajes esperados, una vez terminada la intervención.

Hay pocas publicaciones en las que se hacen explícitos los modelos y estrategias que se han seguido en el diseño y planificación de las propuestas, salvo en el caso de las Tesis doctorales (Pintó Casulleras, 1991; Doménech Blanco, 2000; Domíguez Casiñeiras, 2000; Tarín, 2000; Ulloa Lugo, 2006). En artículos como García-Rodeja *et al.* (1989), Domínguez e Illobre (1997), Domínguez (2001), Domínguez *et al.* (2001) y Domínguez (2007) se describen las estrategias en las que se basan varias de las propuestas de nuestro grupo de investigación, y en Pereira García y Domínguez Castiñeiras (2009) se detalla el modelo de diseño y planificación que ha guiado nuestra propuesta para la enseñanza de la Termoquímica en el Bachillerato. También de Pro Bueno (2009) detalla las etapas de la planificación de una unidad didáctica, en este caso sobre el uso de los recursos energéticos para la asignatura de Ciencias para el mundo contemporáneo (energía, tipos y transformación, consumo y ahorro energético, fuentes y centrales de energía, consecuencias ambientales, económicas y sociales del uso de la energía…)

En cuanto al proceso de implementación de las propuestas didácticas, destacamos tres en las que se han analizado las interacciones discursivas en aulas de la enseñanza preuniversitaria: Laburú y Niaz (2002), Dumrauf y Cordero (2004) y Ribeiro Amaral y Mortimer (2004). En el primer caso, Laburú y Niaz (2002) desarrollaron un marco lakatosiano para analizar situaciones de interacción entre alumnos en la comprensión de la energía interna y la temperatura, basándose en una aproximación dialéctica que incorpora el desarrollo cognitivo piagetiano y la aproximación sociocultural vygotskiana. En el segundo caso (Dumrauf y Cordero, 2004), las interacciones se categorizaron en conceptuales, focales, discursivo-simbólicas, institucionales, sociales y afectivas, y se caracterizaron las situaciones de aula atendiendo a las inestabilidades conceptuales que se generaron a lo largo de la intervención. En el tercer caso (Ribeiro Amaral y Mortimer, 2004), como instrumento de análisis de la dinámica discursiva se utilizó la noción de perfil conceptual, que modeliza el proceso de generación de nuevos significados considerando las relaciones entre las formas de pensar y los modos de hablar. La heterogeneidad del pensamiento verbal se pone de manifiesto con la coexistencia de distintos significados para una misma palabra o concepto. Las distintas zonas del perfil conceptual permiten examinar esta coexistencia de distintas formas de pensamiento y lenguaje que se caracterizan por distintos compromisos

epistemológicos y aspectos ontológicos del concepto. Desde este punto de vista, la evolución del conocimiento no se concibe como un cambio conceptual, sino como un enriquecimiento del espectro de relaciones de ideas que se refieren a un concepto dado. Ribeiro Amaral y Mortimer (2004) aplicaron esta perspectiva de análisis a los conceptos de entropía y espontaneidad.

Un caso de implementación poco habitual de las actividades es el de Baser y Geban (2007), que llevaron al aula una propuesta basada en el cambio conceptual para la enseñanza del calor y la temperatura, la capacidad calorífica, el equilibrio térmico y la energía interna. Se ofreció a alumnos de secundaria una serie de textos informativos sobre las ideas alternativas, y se les ayudó a explorar la diferente capacidad predictiva de éstas y de las ideas de la ciencia escolar. Los resultados de la investigación indican avances en los conocimientos, pero no se observan mejoras en la actitud hacia la Ciencia y su aprendizaje.

Algunas publicaciones introducen la historia de la Ciencia como recurso didáctico, como es el caso de Pessoa y Castro (1992) o de Berg (2008), en las que trabaja la perspectiva histórica de los conceptos de calor y temperatura, la de de Berg (1997) sobre el trabajo, la de Lopes (2009) sobre la energía, la de Furió-Gómez, Solbes y Furió-Mas (2007) sobre el primer principio, o la de Duprez, Méheut y Kermen (2004), para la enseñanza de la irreversibilidad. Más llamativa es la utilización de textos literarios de ciencia-ficción como recurso, que se observa en las propuestas de Liberko (2004), Viau y Moro (2010) y Zamorano *et al.* (2011). En la investigación de Liberko (2004), los alumnos discuten desde el punto de vista termodinámico el argumento de una novela en la que se destruye la vida en la Tierra a causa de una propiedad específica de una nueva sustancia, llamada hielo-nueve, cuya forma cristalina, sembrada sobre el agua de los mares y océanos, hace que éstos solidifiquen al instante. Viau y Moro (2010) presentan una actividad en la que se lleva al aula de una Facultad de Ingeniería el cuento *El Demonio de Maxwell* de Gamow, con el objetivo de que los estudiantes realicen una evolución conceptual hacia un perfil epistemológico racionalista, partiendo del análisis de los aspectos epistemológicos y del contexto histórico del relato. Un año después, Zamorano *et al.* (2011) propusieron dos relatos de ciencia-ficción, uno de I. Asimov y otro de I. Calvino, que comparten un isomorfismo estructural con los modelos científicos que se pretendían desarrollar en un aula de Polimodal, teniendo en cuenta los niveles explicativos fenomenológico, microscópico y estadístico. Para determinar la evolución conceptual de los alumnos sobre la conservación y degradación de la energía, la entropía, la espontaneidad e irreversibilidad y la muerte térmica, utilizaron como forma de intermediación analógica la narrativa.

En la mayoría de las propuestas de enseñanza que aparecen en las publicaciones del área abundan las actividades mediante las que se plantean situaciones problemáticas y cuestiones abiertas. Entre ellas destacamos algunas secuencias didácticas o actividades aisladas que se centran en la enseñanza y

aprendizaje del calor y la temperatura (Tiberghien, 2980, 1989: Domínguez *et al.*, 1996; Reif, 1999; Taber, 2000; Cervantes *et al.*, 2001; Odetti *et al.*, 2001; Cervantes *et al.* (2005) en el concepto de energía (Duit, 1984; Hierrezuelo y Montero, 1988; Hierrezuelo y Molina, 1990; Trumper, 1990b; Duit y Häussler, 1994; Prideaux, 1995; Raviolo, 1996; Saltiel, 1997; Varela *et al.*, 1997; Pétursson, 2003; Solbes y Tarín, 2004; Swackhamer, 2005; Solbes y Tarín, 2008; Solbes, Guisasola y Tarín, 2009; Papadouris y Constantinou, 2010), en el estudio de la Termoquímica (Schollum, 1981; van Huis y van den berg, 1993; Alonso y Finn, 1997; Martínez y Pérez, 1997; Arons, 1999; Niaz, 2000, 2006; Baser y Geban (2007; Chang (2011) y en la Termodinámica Química (Alonso y Finn, 1995, 1996; Otero y Brincones, 1987; Arnold y Millar, 1996; Cárdenas y Ragout de Lozano, 1996; Treptow y Jean (1998); Cotignola, 2001; Mirone y Benedetti, 2001; Lambert, 2002a; ten Hoor, 2003; Kind, 2004b; Lambert, 2005a; Kermen y Méheut, 2009: García García y Rentería Rodríguez, 2013).

Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen actividades de laboratorio

Las primeras publicaciones del área en las que se insiste sobre la necesidad de integrar las experiencias de laboratorio en la enseñanza de la Termodinámica datan de los años 70 (Ogborn, 1976). Sin embargo, desde entonces apenas se han publicado propuestas didácticas que contengan entre sus actividades la realización de experiencias, y en los años 90 los investigadores seguían preocupados por estas carencias (Becu-Robinault y Tiberghien (1998).

Las actividades de laboratorio más aceptadas por los investigadores son las experiencias calorimétricas, cuya implementación se describe al detalle en artículos como los de Cohen y Ben-Zvi (1982), Greenbowe y Meltzer (2003) o Castrillón Ruiz (2013). Otros experimentos interesantes tienen que ver con procesos redox llevados a cabo en celdas galvánicas, sobre los cuales se propone el cálculo de las ΔH, ΔS, y ΔG asociadas a las reacciones (Bindel, 2000, 2004) o de la fuerza electromotriz y el trabajo útil realizado (Williamson y Morikawa (2002). Se han diseñado varias actividades de laboratorio para el nivel universitario, como un experimento cinético y termodinámico sobre las oxidaciones electrocatalíticas de varios metales que utiliza la fiambrera *HeaterMetals* para calentar los alimentos (Jensen, 2000), o un simulador del intercambio de cationes sodio y potasio entre una célula viva y su medio (Carvalho *et al.* (2009); en esta publicación se propone además llegar al cálculo de constantes de equilibrio a partir de los datos que se obtienen de una experiencia en la que las reacciones químicas de interés tienen lugar en un montaje experimental formado por vasos comunicantes y contectado a un circuito electrónico que muestra la cantidad de energía puesta en juego en el proceso. Este tipo de simulaciones sirve para desarrollar ideas científicas relacionadas con la dinámica de diversas reacciones bioquímicas, como la ruta de la glucólisis o las reacciones catalizadas por las enzimas aldolasa, GAP deshidrogenasa, fosfoglicerato quinasa o fosfoglicomutasa.

Otra experiencia práctica, esta vez para la introducción de la Termodinámica estadística, se describe en LoPresto (2010): se aplican nociones básicas de combinatoria a las puntuaciones reales obtenidas en el lanzamiento simultáneo de varios dados, y sobre esta base se desarrollan los conceptos de probabilidad y multiplicidad de los microestados, y se construye la idea de que las predicciones basadas en muestras mayores, con un gran número de datos, son las que alcanzan una mayor precisión.

Sin llegar a realizar una simulación, Kind (2004b) también introduce la perspectiva aleatoria de la Termodinámica estadística a partir del análisis de la probabilidad de eventos cotidianos, desde los muy probables (que amanezca al día siguiente), hasta los moderadamente probables (que un equipo gane la liga de fútbol) o los casi improbables (como ganar la lotería).

La literatura del área también recoge varias recomendaciones para la realización de las actividades prácticas en Termodinámica. Por ejemplo, Cortel Ortuño (1999) aconseja que las experiencias de laboratorio utilicen en la medida de lo posible solamente materiales baratos, que sean fáciles de reponer y que no tengan costes altos de mantenimiento. Si además el experimento admite variaciones, si es visualmente atrayente y si los materiales son conocidos para los alumnos, la significatividad aumenta. Por ejemplo, en una unidad didáctica de Termoquímica se puede incluir una experiencia práctica sobre una reacción de combustión en un entorno controlado: unas gotas de combustible (como la gasolina) se vierten dentro de una cajita para carretes fotográficos. La explosión se puede iniciar mediante una chispa eléctrica proporcionada por un mechero de cocina. A partir de esta experiencia se pueden trabajar contenidos conceptuales sobre el calor y el trabajo de expansión de los gases (la variación de energía cinética de la cajita, que sale disparada, se relaciona con el trabajo de expansión). Si al montaje práctico se le añade un difusor para generar un aerosol de combustible, la explosión que se produce se parece más a la que tiene lugar en los cilindros de los motores de los automóviles, en los que parte de la energía liberada de la combustión se utiliza para mover un pistón. Se puede relacionar el experimento con el rendimiento teórico de un motor de gasolina, que nunca es mayor del 50-60%.

Flores *et al.* (2005) sugieren que la realización de las experiencias se base en la estrategia POE (predicción, observación, explicación), en la cual se presenta a los alumnos una información sobre el experimento que van a realizar y se les pide que predigan qué cambios se observarán. Durante la experiencia, los alumnos describen sus observaciones. Para terminar, se les pide que elaboren una explicación en la que concilien sus ideas sobre la predicción que habían expresado al inicio y las posteriores observaciones. Después de implementar la unidad didáctica que diseñaron estos autores para la enseñanza de la presión a partir de una experiencia sobre el funcionamiento de un manómetro en U, concluyen que no resultó fructífera para el aprendizaje la estrategia de dividir a los estudiantes en equipos de manera

que cada uno hiciera un experimento diferente. Con esta estrategia, los alumnos tendieron a focalizar su atención únicamente en la experiencia de su grupo y no se preocuparon por comprender el conjunto de las realizadas en clase.

Por su parte, de Vos y Verdonk (1986) enfatizan en que al llevar las experiencias de laboratorio al aula no se pretende que los estudiantes imiten el trabajo de los científicos profesionales: se trata de llegar a generar un diálogo entre el alumno/observador y el mundo natural que lo rodea. Para lograr este objetivo, proponen que los experimentos sobre los efectos térmicos de las reacciones químicas se incluyan en las primeras actividades de las secuencias didácticas sobre Termodinámica. Así, las cuestiones a las que se pretende responder se van a formular a partir de las observaciones realizadas en las experiencias. A continuación se construyen los conocimientos científicos que permiten dar respuestas razonadas. En su artículo, estos investigadores ofrecen como ejemplos varios procesos químicos cuyos efectos térmicos son fácilmente observables: la reacción entre lana de acero y una disolución de sultafo de cobre, la neutralización de HCl y NaOH (práctica que se recoge también en Le Maréchal y El Bilani (2008), y la reacción entre la sosa Solvay ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$) y el $NaFe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, que además de producir la liberación de gas CO_2, es endotérmica. En Mills y Guilmette (2007) se ofrecen variantes a la clásica reacción de neutralización de NaOH y HCl, sutituyendo el ácido clorhídrico por ácidos orgánicos como el láctico, el oxálico o el cítrico.

Para finalizar, destacamos una propuesta de enseñanza para el primer curso de Universidad (Read y Kable, 2007), en el marco del proyecto *ACELL* (*Advancing Chemistry by Enhancing Learning in the Laboratory*). En esta aportación se describe una unidad didáctica articulada por una serie ecléctica de diez experiencias de laboratorio. La dinámica de aula que recomiendan los autores incluye fases de observación, discusión y explicación de los fenómenos propuestos. En todos los experimentos se observan efectos térmicos interesantes para la enseñanza de la Termodinámica básica. El primer experimento consiste en extender y contraer una banda elástica apoyándola contra los labios para percibir las diferencias de temperatura. En el segundo experimento se utilizan distintas gomas elásticas para colgar una masa de 1 kg y observar los efectos térmicos. La tercera experiencia es la sublimación del yodo sólido. La cuarta juega con los cambios de fase que se producen como consecuencia de procesos termodinámicos: al calentar una mezcla bifásica de fenol y agua, el sistema se vuelve monofásico, mientras que al calentar una mezcla monofásica de nicotina y agua, la única fase inicial se separa en dos. El quinto experimento consiste en el funcionamiento del montaje del pato que bebe (*Drinking Duck*). En el sexto se estudia el efecto de la temperatura sobre el equilibrio de tres óxidos de nitrógeno: el NO_2, predominante a altas temperaturas; el N_2O_4, mayoritario a temperatura ambiente; y el N_2O_3, que se forma en gran cantidad a temperaturas muy bajas, por ejemplo cuando el sistema se sumerge en una camisa de N_2 líquido. La séptima experiencia presenta el efecto de la presión sobre el

equilibrio del NO_2 y el N_2O_4 (la formación de éste último se favorece a bajas presiones). En la octava actividad práctica, se utiliza un cristalizador para hacer reaccionar el nitrato de amonio y el hidróxido de bario octahidratado, habiendo introducido previamente en el recipiente un tubo de ensayo o un vaso de precipitados con agua líquida. La temperatura de la mezcla de reacción disminuye tanto que se observa claramente cómo el agua del tubo de ensayo solidifica. La novena experiencia también produce cambios de estado de agregación, en este caso aplicando vacío dentro de un tubo en forma de U que contiene una pequeña cantidad de agua. Al inclinar el tubo en U para desplazar el agua hacia una rama, y sumergir la otra rama en N_2 líquido, se observa que el agua entra en ebullición y enseguida solidifica. En la décima y última experiencia, se colocan cristales de una sustancia cualquiera (sal común, azúcar…) encima de una bolsa que contiene una disolución de acetato de sodio sobresaturado, y se observa que ésta cristaliza.

Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen la utilización de modelos y analogías en la enseñanza de la Termodinámica

Son bastantes las propuestas que incluyen en su planificación el desarrollo de modelos científicos relacionados con el dominio microscópico de la materia, y entre ellas destacan las siguientes, que tratan la Termoquímica (Schollum, 1981; Cohen y Ben-Zvi, 1982; de Vos y Verdonk, 1986; Cohen y Ben-Zvi, 1992; Ben-Ziv, Silberstein y Mamlok, 1993; Barker y Millar, 2000; Niaz, 2000; Greenbowe y Meltzer, 2003; Belt *et al.*, 2005; Niaz, 2006; Zamorano, 2006; read y Kable, 2007; Le Maréchal y El Bilani, 2008; Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2009; Castrillón Ruiz, 2013) o la Termodinámica Química (Otero y Brincones, 1987; Banerjee, 1995; Cárdenas y Ragout de Lozano, 1996; Stylianidou y Boohan, 1998; Lechner, 1999; Bindel, 2000; Mirone y Benedetti, 2001; Lambert, 2002a; Teichert y Stacy, 2002; Bindel, 2004; Duprez, Méheut y Kermen, 2004; Holman y Pilling, 2004; Kozliak,2004; Lambert, 2005a; Liberko, 2005; Kermen y Méheut, 2009; Viau y Moro, 2010; Kermen y Méheut, 2011; Zamorano, Moro y Gabbs, 2011; Iyengar y de Souza, 2014).

En cambio, otras aportaciones de la literatura del área destacan por la utilización de modelos y analogías del dominio macroscópico. Para resumirlas, comenzamos por aquéllas que sugieren trabajar con modelos macroscópicos para desarrollar conceptos del dominio macroscópico:

En algunas propuestas de enseñanza se trabaja con la idea de "diferencia" como motor de los procesos (ver Ogborn, 1990; Boohan y Ogborn, 1996; Millar, 2005). Cuando entre un sistema y su entorno existe una diferencia en el valor de alguna propiedad física o química, el sistema evoluciona espontáneamente en el sentido en el que se elimine la diferencia. Así pues, podemos considerar que los procesos termodinámicos están causados y conducidos por la diferencia de situación energética entre el sistema y el entorno (o entre distintas partes del sistema), de tal manera que, cuanta mayor diferencia de propiedad hay, más

violento es el cambio. La limitación de cualquier proceso está en la posibilidad que tienen sistema y entorno para transformar, transferir y degradar energía.

Otro modelo macroscópico que se ha sugerido para desarrollar en la enseñanza preuniversitaria es el de la "cadena de energía", que fue llevado al aula por Le Maréchal y El Bilani (2008) en una secuencia de actividades diseñada para promover en los alumnos de 17 años el aprendizaje de los aspectos macroscópicos y microscópicos relacionados con las transferencias de energía que se producen en las reacciones químicas y los cambios de estado de agregación. El modelo de la "cadena de energía" deriva de las reflexiones de Feynman: la energía es una cantidad que pertenece a los sistemas y verifica las propuedades de conservación, almacenamiento y transferencia. Según el modelo de la cadena, la energía se almacena en reservorios y se puede transferir por tres maneras distintas (calor, trabajo o radiación), con las consiguientes transformaciones entre tipos de energía. Cualquier situación que implique cambios energéticos se puede representar como una cadena cuyos eslabones simbolizan las transformaciones energéticas.

Hasta aquí, las propuestas en las que se utilizan modelos macroscópicos para ayudar a construir relaciones conceptuales del modelo macroscópico. En otras publicaciones, en cambio, el objetivo es construir conocimientos del dominio microscópico utilizando modelos o analogías macroscópicas, tendencia contra la que se pronuncian muchos investigadores, porque los alumnos tienen serias dificultades para reemplazar los modelos concretos analógicos por los modelos abstractos de la ciencia escolar (Gilbert y Osborne, 1980; Domínguez *et al.*, 1995; Harrison y Treagust, 2000a), y tienden a limitar sus interpretaciones a los aspectos macroscópicos de la materia o a desarrollar una consciencia "macrocorpuscular" (*Dificultades relacionadas con la integración de los dominios de representación de la materia*, pág. 124), que se manifiesta en la atribución de características macroscópicas a las partículas microscópicas (Furió y Furió-Más, 2000; Talanquer, 2005). Estas dificultades ya se han puesto de manifiesto repetidamente en la Termodinámica de los procesos químicos (Johnstone *et al.*, 1979; Hofstein, 1983; Gayford, 1986; Cohen y Ben-Zvi, 1992; Storey, 1992; Lambert 1999; Bindel, 2000; Carson y Watson, 2002; Lambert, 2002a, 2002b; Bindel, 2004; Lambert, 2005b; Sözbilir y Bennett, 2007) y en el Equilibrio Químico (ver Rocha, 2008).

Por ejemplo, Weiss (2001) sugiere que la energía de Gibbs se presente a los alumnos de una manera intuitiva mediante un ejemplo de proceso que tiene lugar en un sistema compuesto por un conjunto de saltamontes que, inicialmente, se encuentran detenidos sobre la hierba. El proceso que experimenta el sistema es el salto colectivo de los saltamontes en una dirección, hacia un grupo de nueve casillas iguales que se disponen un cuadrado de tres por tres de tal manera que en las ocho casillas de la periferia hay hierba y la del centro es un agujero en el suelo. Si los insectos, antes de saltar, disponen de una cantidad de energía suficiente, se espera que una tengan una probabilidad ocho veces mayor de aterrizar sobre la hierba que

de caer dentro del agujero. Pero si suponemos que existe una proporción de los saltamontes cuya capacidad de escapar de un estado de baja energía es limitada, entonces crece la cantidad de los que van a parar al agujero, tanto más cuanto más profundo sea éste y cuanto menor sea la capacidad de salto de los saltamontes, factor que depende de la temperatura. Parece que el autor no ha cuidado demasiado la planificación de la dificultad de las ideas que presenta la analogía, porque comienza sugiriendo que el sistema se encuentra un estado inicial estático (lo que puede llevar a los estudiantes a pensar que las partículas no se mueven ni interaccionan en los estados de equilibrio), e inmediatamente después introduce las nociones de microestado energético y pozo de potencial. Además, en cuanto termina el desarrollo de esta analogía macroscópica, el autor *salta* a un complejo tratamiento matemático sobre la distribución de probabilidad de Boltzmann, la energía de Gibbs del sistema y las constantes de equilibrio.

Se han publicado modelos analógicos macroscópicos basados en objetos tangibles, como el que Kind (2004b) sugiere en una actividad titulada "el asesino molecular". En ella, los alumnos construyen con pequeñas piezas una representación espacial de las moléculas de los reactivos de una reacción de combustión. A continuación, se les pide que "asesinen las moléculas", esto es, que desarmen el montaje separando todas las piezas. Con esta acción se pretende que los estudiantes visualicen que la ruptura de enlaces químicos requiere energía. En este punto, la autora recomienda detener la analogía macroscópica e introducir la idea de que la formación de los productos de reacción es el proceso contrario al anterior e implica la generación de nuevos enlaces, con lo que en vez de requerir energía, ésta se libera. Parece que con ello se intenta evitar que los alumnos se refuercen en la idea alternativa de que formar enlaces también requiere energía, pero la utilización de la analogía macroscópica podría reafirmar esta concepción: ensamblar las piezas para formar un montaje que represente una molécula requiere energía, así que ensamblar los átomos mediante las estructuras *físicas* que son los enlaces, también.

Cohen y Ben-Zvi (1982) diseñaron e implementaron una propuesta de enseñanza para alumnos de 17 años, que incluye un ciclo de actividades organizadas en cuatro fases. Tres de ellas están dedicadas a la construcción de conocimientos del dominio macroscópico, y la cuarta se centra en la complementación de la perspectiva macroscópica con la microscópica a través de analogías que se ponen en práctica mediante la realización de tres juegos cuyo objetivo es ayudar a los estudiantes a entender la relación entre las transformaciones energéticas y la evolución que experimentan los sistemas materiales. En el primer juego, los alumnos intercambian notas de papel que simbolizan "vales" por unas determinadas cantidades de energía. Se trata de un juego de rol en el que por cada enlace que se rompe se "paga" energía, y se "recibe" energía por cada enlace formado. El segundo juego, que sirve para introducir el concepto de *calor de formación*, es una extensión del primero: la energía se "paga" en la ruptura de todos

y cada uno de los enlaces de los compuestos químicos (con lo que se generan los elementos constituyentes), y a continuación se "recibe" energía por la formación de los enlaces que dan lugar a nuevos compuestos. El tercer juego es, a su vez, una variante del segundo que presenta como novedad los procesos microscópicos en los que se involucran iones. En Hanson y Michalek (2006) encontramos un modelo analógico similar, en el que se utiliza dinero como patrón de cambio para representar las transferencias de la energía. El concepto de distribución de energía y su relación con la variación de la entropía y de la energía de Gibbs se introduce a partir del recuento del dinero intercambiado.

Para la enseñanza de la entropía, algunos autores aconsejan que se utilicen metáforas y situaciones cotidianas en las que se observe fácilmente que la materia tiende a desorganizarse con cada proceso que sucede en el Universo. Por ejemplo, Ross (1988) recoge varios ejemplos que forman parte de la experiencia diaria: sin el trabajo que obtenemos de los recursos energéticos y de la realización de nuestras tareas personales, los edificios y demás infraestructuras se derrumbarían y los minerales seguirían "desordenados" en las rocas. Los ejemplos de este tipo se extienden a la escala microscópica para interpretar procesos como la fotosíntesis, la respiración o el aporte de energía del Sol a la Tierra, la formación de cristales…, incluyendo la idea de que esta tendencia de la materia al caos se refiere al universo en su totalidad y no solamente al sistema. Por su parte, Jeppsson (2011) propone que se relacionen las distintas interpretaciones de la entropía en relación con las acepciones que tiene el término (desorden, libertad, degradación, dispersión, información…) y sobre esta base se analicen en el aula la potencialidad expresiva y las limitaciones de las acepciones, metáforas y analogías que se utilizan para referirse a esta magnitud termodinámica.

En la sección *Letters* de un número del *Journal of Chemical Education* encontramos una discusión sobre las metáforas y símiles macroscópicos que se aplican a los aspectos microscópicos de la Termodinámica: Leonard (2006) propone que el equilibrio alcanzado por un sistema se visualice como una situación de "compromiso" análoga a la que en materia de "seguridad" y "libertad" formulan las autoridades de algunos países occidentales (como EEUU, desde donde Leonard hace su propuesta) ante las amenazas de atentados terroristas a gran escala. Para Leonard, en la ecuación logarítmica (neperiana) de la constante de equilibrio se observa el balance entre la contribución entálpica, que representa el nivel de "seguridad" del sistema, y la contribución entrópica o nivel de "libertad". Este símil compara la limitación que se imponen mutuamente las contribuciones entrópica y entálpica en la evolución del sistema, con las restricciones que en el Occidente actual se imponen en materia de *libertad* en aras de la *seguridad* (y viceversa). Para Wójcik (2006), quien interviene en las mismas *Letters*, Leonard ofrece un claro ejemplo de asociación antropomórfica entre conceptos científicos, lo que desde luego cae fuera del marco conceptual de la Ciencia y además puede sugerir a los alumnos una

noción de *libertad* que nada tiene que ver con el significado científico del término. A esto podríamos añadir que este símil quizá tenga, consciente o inconscientemente, la pretensión de revestir de validez o fiabilidad científicas una determinada concepción política de la *libertad*, lo que resulta totalmente contrario a una de las finalidades de la ciencia escolar, tal como las hemos enunciado (*Figura* 4, pág. 26): fomentar en los alumnos una actitud crítica y una independencia de pensamiento que les ayude en su formación como individuos integrantes de una sociedad democrática en la que la argumentación y el razonamiento sirvan como destrezas cognitivas que ayudan a tomar decisiones personales y colectivas.

Un último ejemplo de modelos analógicos macroscópicos mediante los que se pretende ayudar a construir conocimientos microscópicos es el de Zamorano *et al.* (2006), encaminado a la enseñanza de la energía interna y la temperatura para alumnos de 16-17 años de edad. Un juego de rol similar a éste es el propuesto por Tyas y Cabot, 1999 para ilustrar las transferencias energéticas involucradas en las reacciones exotérmicas.

En la actividad que diseñaron Zamorano *et al.* (2006), los alumnos adoptan el rol de partículas de un gas monoatómico ideal en el interior del recipiente aula; cada alumno lleva en la mano un martillo en el que hay escrito un número que simboliza la energía de cada partícula. La distribución de energía en el sistema se manifiesta a través del movimiento de translación de los alumnos por el aula (suponen que no hay energía de rotación o vibración, ni energía relacionada con los campos). Se supone que en el aula vecina a aquélla en la que se implementa la actividad (ambas de igual tamaño) existe un número mayor de alumnos y que cada uno de ellos porta una cantidad de energía menor, de tal manera que el total de energía interna de ambos sistemas es el mismo. El termómetro se presenta como un dispositivo que mide la energía cinética promedio de las partículas de una manera análoga a las atracciones de feria en las que se mide la fuerza que se puede ejercer a golpe de martillo. Al comparar la temperatura de ambos sistemas, se observa que es mayor en el de mayor cantidad de energía por partícula (alumno).

Zamorano *et al.* (2006) evaluaron la efectividad de este modelo analógico para promover aprendizaje, y no se observaron diferencias significativas entre el grupo experimental y un grupo de control que había recibido una instrucción de metodología tradicional. De la revisión de las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje que hemos realizado (*Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica*, pág. 123), concluimos que la utilización de este modelo analógico macroscópico puede fomentar la identificación alternativa entre energía (interna) y fuerza o el trabajo, principalmente por dos motivos: porque la energía se simboliza mediante un número que los alumnos pueden identificar como la cantidad de fuerza/trabajo que se realiza con el martillo, y porque la medición de la energía se identifica con la estimación de la fuerza que se ejerce al golpear una superficie (o con el trabajo que se genera).

Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen recursos visuales

Son varias las propuestas de enseñanza que incluyen en sus unidades didácticas alguna actividad relacionada con la elaboración o la interpretación de gráficas, diagramas o imágenes. En general, podemos diferenciar dos enfoques metodológicos en las propuestas que utilizan recursos visuales:

Algunas incluyen estos recursos con el objetivo de evitar que el aprendizaje de los aspectos cuantitativos relacionados con las magnitudes termodinámicas se reduzca a la manipulación irreflexiva de datos numéricos para obtener un resultado. En este caso, los recursos visuales se emplean como una herramienta de apoyo para la construcción de conocimientos procedimentales asociados a conceptos abstractos. Por ejemplo, en Termodinámica es frecuente simbolizar el balance global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno mediante una cantidad numérica que indica el orden de mangitud y el sentido de la transferencia; pero esta misma información también se puede expresar de una manera gráfica en un diagrama entálpico, mediante la comparación visual de las líneas que simbolizan los niveles de energía del sistema en los distintos estados. Por supuesto, el lenguaje visual tiene que ser consistente con el lenguaje científico.

Otras propuestas, en cambio, utilizan el lenguaje visual como un recurso para llegar a construir el significado de los conceptos termodinámicos. Los materiales gráficos y simbólicos se seleccionan de manera que desarrollen todos los conceptos que se pretenden relacionar, y que ayuden a poner en juego todas las destrezas, estrategias y técnicas deseables.

En España, las dos propuestas más destacadas por la utilización de recursos visuales en Termodinámica son las de Pérez-Landazábal y Varela-Nieto (2006) para la enseñanza del calor y la energía interna, y la de Ametller y Pintó (2002), más generalista. Podemos relacionar la unidad didáctica de Pérez-Landazábal y Varela-Nieto (2006) con el primero de los dos enfoques de trabajo que acabamos de describir, porque se desarrolla en seis actividades entre las cuales se incluyen diagramas que ayudan a visualizar el calor como un proceso de transferencia de energía desde un estado del sistema a otro, y a conceptualizar los aspectos de cálculo como una manera más de representar los cambios energéticos que suceden como consecuencia de los procesos termodinámicos. Por su parte, la propuesta de Ametller y Pintó (2002) encaja más en la línea de los autores que se sirven de distintos tipos de representaciones visuales para ayudar a los alumnos a construir el significado de las características de la energía (transferencia, transformación, conservación…) Un caso destacado de este enfoque es el de Ben-Zvi *et al.* (1993), que utilizaron un modelo visual para introducir la noción de equilibrio termodinámico. En un artículo anterior, Cohen y Ben-Zvi (1992) habían recurrido a representaciones simbólicas y gráficas para apoyar la conceptualización de los balances de transferencia por calor y trabajo y los aspectos energéticos de las formaciones y

rupturas de enlaces químicos. En 1993, volvieron a aplicar diagramas de energía para estudiar las transferencias energéticas de un proceso físico (el movimiento de un objeto que se levanta con una polea y después se deja caer) y un proceso químico (la disociación simultánea de los gases diatómicos hidrógeno y cloro, y su proceso inverso). Pero incorporaron una innovación con respecto a la propuesta anterior: para desarrollar un modelo cinético molecular que justifique la degradación macroscópica de la energía como una dispersión energética microscópica entre las partículas del sistema, representaron estas relaciones conceptuales mediante dibujos donde se observa que las partículas que componen el sistema se mueven, chocan entre ellas y transfieren energía entre sí y con las partículas del entorno. Utilizando este recurso también se explica desde la perspectiva microscópica la tendencia de los sistemas naturales a alcanzar un estado de equilibrio termodinámico. Además, estos investigadores elaboraron un nuevo ejemplo gráfico para comparar la cantidad de energía de dos sistemas: uno compuesto por tres partículas, cada una de las cuales tiene una unidad de energía, y otro compuesto por seis partículas sin energía.

Los recursos visuales más utilizados en la enseñanza de la Termodinámica son los diagramas *PV*, que ayudan a conceptualizar el trabajo como un proceso de transferencia de energía (función de la trayectoria), y los diagramas entálpicos, que ilustran las leyes de la Termoquímica (Hess y Lavoisier-Laplace). En cuanto a las curvas de calentamiento o enfriamiento, aparecen en algunas actividades de propuestas para la enseñanza del calor, como la de Domínguez Castiñeiras (2000, 2001), Domínguez Castiñeiras *et al.* (2001) sobre calor y temperatura, o la de Cervantes *et al.* (2005) sobre el modelo del calor latente de fusión.

Entre los materiales relacionados con los diagramas *PV* (casi siempre correspondientes a procesos cíclicos) destacamos la propuesta de Hamilton (2003) para introducir el significado macroscópico del segundo principio de la Termodinámica, y la reciente contribución de Iyengar y deSouza (2014), que utilizaron estos diagramas en la enseñanza universitaria para construir los conceptos de función de estado y función de la trayectoria, y para presentar de manera visual el primer principio de la Termodinámica y la entropía, que mediante los diagramas *PV* se observa como el máximo trabajo que puede realizar un sistema en unas condiciones determinadas.

En los diagramas entálpicos se ofrece una representación gráfica de la cantidad de energía puesta en juego en reacciones que se pueden organizar en ciclos termoquímicos, como el de Born-Haber. Estas representaciones se suelen utilizar en apoyo de las interpretaciones macro y/o microscópicas de los balances energéticos netos de los procesos químicos. Los principales autores que han publicado materiales de enseñanza sobre este particular son Barker y Millar (2000) y Kind (2004a). Incorporando a las representaciones gráficas la idea de que una cantidad de energía se transfiere de manera útil (realiza trabajo), mientras que otra se dispersa

de manera no útil, se pueden introducir relaciones sobre el segundo principio de la Termodinámica, la entropía y la energía de Gibbs (Kind, 2004b).

Se han propuesto más recursos visuales sobre la entropía (Lechner, 1999; Wood y Battino, 2001; Novak, 2003; Kozliak, 2004; Iyengar y deSouza, 2014). En particular, autores como Novak (2003), Kozliak (2004) o Iyengar y deSouza (2014) proponen la utilización de diagramas sobre la población de los microestados de energía para enseñar los aspectos microscópicos del segundo principio de la Termodinámica. Con los diagramas de niveles energéticos se pueden visualizar aspectos mecánico-estadísticos (como la distribución de Boltzmann) y cuánticos (cuantización de la energía, saltos energéticos y emisión/absorción fotónica).

Otras propuestas de enseñanza utilizan un lenguaje pictórico para representar distintas situaciones y fenómenos naturales. Sobre esta base, se elaboran actividades en las que se pide a los alumnos que interpreten las transformaciones y transferencias de la energía de algunos sistemas reales. Destaca en este sentido la propuesta de Boohan y Ogborn (1996), titulada "energía y cambio", mediante la que se introducen el segundo principio de la Termodinámica y el concepto de espontaneidad para alumnos de 11 años en adelante (Stylianidou y Boohan, 1998). La idea central de la propuesta es la de la "diferencia" de propiedades físicas y/o químicas como motor de los procesos (ver Ogborn, 1990). Estas ideas se aplican a diferentes procesos, como los cambios de estado de agregación, las disoluciones y mezclas, las cristalizaciones o las transferencias de energía por calor entre cuerpos a diferente temperatura. Los contextos en los que se pueden presentar estos procesos son muy variados y permiten relacionar conocimientos de la Física, la Química y la Biología. Una propuesta similar a ésta es la de Trumper (1991), en la que se pidió a los alumnos que aportaran sus propias descripciones de una serie de dibujos en los que se representaban fenómenos relacionados con las transformaciones y transferencias de la energía.

Propuestas y materiales de aprendizaje que incluyen recursos de la enseñanza asistida por ordenador

En cuanto a las propuestas didácticas de Termodinámica que incluyen la utilización de recursos informáticos como hojas de cálculo, interfaces o programas de *software*, tienen su antecedente en trabajos como el de Brosnan (1990), donde se utilizó una hoja de cálculo para obtener los valores de variación de entropía correspondientes a distintas condiciones de realización del proceso Haber. Más de una década después, autores como Kind (2004b) también recomiendan utilizar estos recursos para hallar la cantidad de energía involucrada en las rupturas y formaciones de enlaces químicos.

Destacamos ocho publicaciones dedicadas a la elaboración de nuevos materiales didácticos relacionados con Internet y el mundo virtual; de éstos, cinco han sido diseñados para el nivel universitario. Los resumimos en orden cronológico:

En la contribución de Turégano *et al.* (2001) se describe *Termograf*, una herramienta de interfaz gráfica para la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica Ingenieril. Esta interfaz permite trabajar con análisis gráficos y realiza balances de calor, trabajo, variación de energía total y variaciones de entropía y exergía utilizando una base de datos de gran variedad de sustancias.

Watson y Eisenstein (2002) proponen la utilización de paquetes computacionales para realizar cálculos sobre estructuras moleculares y electrónicas relacionadas con la entropía. El inconveniente principal de estos recursos es que su implementación en el aula requiere alguna sesión de introducción a la química computacional, a la teoría de la función de densidad y al manejo del *software*. Años después, Le Maréchal y El Bilani (2008) también recurrirían a una simulación por ordenador para trabajar con los aspectos microscópicos de las reacciones químicas; se modelizan las rupturas y formaciones de enlaces implicadas en la combustión del etanol y en la reacción de formación de HCl a partir de sus elementos.

En 2004, Zielinski (2004) diseñó cinco plantillas del programa *Mathcad* para automatizar el tratamiento matemático de cinco aspectos termodinámicos diferentes: el cálculo integral del trabajo *PV*, la distribución de Boltzmann de una serie dada de partículas, la expresión que relaciona la energía de Gibbs y el equilibrio de las reacciones químicas, la vinculación entre los potenciales intermoleculares y el segundo coeficiente del virial, y algunos aspectos de la mecánica cuántica. Holman y Pilling (2004) proponen demostraciones y cuestionarios virtuales en su aproximación termodinámica basada en el contexto.

Varios años más tarde, Torres Zúñiga (2011) aprovechó como herramienta de enseñanza y aprendizaje un *blog* prediseñado, para apoyar una intervención de aula sobre Termodinámica en niveles preuniversitarios. Entre los elementos multimedia insertados en el *blog* destacan hipervínculos, imágenes, animaciones *flash*, *applets* y documentos interactivos sobre temperatura, calor, mezclas, cambios de fase, tipos de procesos termodinámicos, máquinas térmicas y su eficiencia, y entropía. Los parámetros que sirvieron para el diseño del *blog* están basados en las conclusiones de estudios sobre los hábitos de lectura de los cibernautas. Por este motivo, el número de palabras por *post* es menor que 500, los párrafos son cortos y favorecen el formato de lista para permitir una lectura "en diagonal", rápida y a saltos.

Méndez Coca (2012) comparó la eficacia de una metodología tradicional con una de aprendizaje cooperativo apoyada por las TIC. La unidad didáctica sobre la que se realizó la implementación era de Termodinámica básica en 3º de la ESO. Observaron que con la utilización de las TIC el alumnado manifestaba un mayor interés; pero el método más eficaz en aumentar la motivación era la estrategia cooperativa. En cuanto a la eficacia en la realización de las actividades, el uso de las TIC no logró diferencias significativas con respecto a la metodología tradicional. La estrategia de aprendizaje cooperativo sí generó mejores resultados.

También utilizaron una metodología de aprendizaje cooperativo Durán-García y Durán-Aponte (2013b), ayudándose de un foro electrónico como herramienta de apoyo para el aprendizaje del tema de calor y temperatura en una Universidad venezolana. En otras publicaciones del mismo grupo (Durán García y Durán Aponte (2013a) y Durán-Aponte y Durán-García (2013) se describe la influencia de la estrategia de aprendizaje cooperativo en varios aspectos, como la resolución de problemas basados en el primer principio de la Termodinámica, la interacción entre los estilos de aprendizaje, el desempeño grupal y las atribuciones causales que formularon los estudiantes sobre la motivación que les produjo la experiencia. Las intervenciones basadas en estructuras cooperativas de aprendizaje, con o sin utilización de las TIC, parecen tener un cierto éxito entre los investigadores en Didáctica de las Ciencias de un tiempo a esta parte Cordero et al (2002).

Más adelante, en el apartado (*Características del conocimiento previo de los estudiantes*, pág. 415), se resumen de las principales conclusiones que hemos extraído de la revisión del estado de la cuestión, para el diseño y elaboración de nuestras propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química.

Con estas reflexiones se termina la revisión de la literatura científica, mediante la que hemos hecho explícito el marco teórico de esta investigación de Tesis. A continuación se formulan las hipótesis de trabajo que se derivan de estos referentes desde los que se aborda la problemática planteada en la investigación (*Planteamiento de los problemas de investigación*, pág. 11).

I.4. Hipótesis de la investigación

Al plantear los problemas de esta investigación, se pone de manifiesto el propósito de la misma: diseñar, aplicar y evaluar dos propuestas didácticas sobre Termoquímica y Termodinámica Química, que ayuden a los estudiantes a interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales, complementando la perspectiva macroscópica de la Termodinámica Clásica y la perspectiva microscópica de los modelos de partículas, enlace y reacción química. La exposición del marco teórico comenzó con el *Planteamiento de los problemas de investigación* (pág. 11), y para profundizar en ellos se realizó una *Revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pág. 14).

El posterior desarrollo de la investigación supone formular una serie de hipótesis de trabajo que sean formalmente correctas y significativas, que estén basadas en conocimientos previos y que sean susceptibles de contrastar por algún procedimiento (Bunge, 1976). La revisión de la literatura ayuda a concretar los problemas de investigación, a formular las hipótesis y a fundamentarlas sobre la base de conclusiones y argumentos que proceden de los resultados y conclusiones de la investigación científica. Cada una de las hipótesis de trabajo guarda relación con uno de los problemas a los que se pretende dar respuesta. En concreto:

La primera de las hipótesis de trabajo se relaciona con el primer problema de investigación, y hace referencia a las condiciones iniciales del conocimiento de los estudiantes [*Primera hipótesis de trabajo* (*HT1*) , pág. 254]. La segunda hipótesis, vinculada al segundo problema de investigación, está centrada en el seguimiento de la segunda propuesta didáctica [*Segunda hipótesis de trabajo* (*HT2*) , pág. 256]. La tercera hipótesis se corresponde con el tercer problema de investigación y se refiere a dos momentos posteriores a la intervención en el aula: inmediatamente después de la aplicación de la segunda propuesta, y transcurrido un cierto tiempo desde entonces [*Tercera hipótesis de trabajo* (*HT3*) , pág. 257].

Se enuncian a continuación las tres hipótesis de trabajo, en un orden que no responde a su importancia relativa sino a la secuencia temporal del desarrollo de la investigación. Debido a las características y los *tempus* de ésta, la primera y la tercera hipótesis se han operativizado en subhipótesis que se corresponden con distintos momentos clave de la secuencia temporal (*Fases del plan de trabajo y cronología de la investigación*, pág. 260). En el ***Capítulo II*** se detalla cómo se relacionan las hipótesis de trabajo con las variables que intervienen en el proceso de construcción del conocimiento (*Variables implicadas en la investigación*, pág. 286) y con los métodos e instrumentos que se han seleccionado para el contraste de hipótesis (*TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje*, pág. 449).

I.4.1. Primera hipótesis de trabajo (HT_1)

Como se ha indicado en el apartado *Componentes del aprendizaje* (pág. 35), la literatura en Didáctica de las Ciencias señala la importancia de las condiciones iniciales de los estudiantes sobre el diseño experimental de las investigaciones y sobre los aspectos metodológicos que se pretenden estudiar. En la Tesis que aquí se presenta, para dar respuesta al primer problema de investigación se hace necesario analizar hasta qué punto utilizaba el alumnado, al comienzo de la intervención propiamente dicha, las concepciones y destrezas científicas que desde la ciencia escolar se consideran básicas en la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. De esta reflexión se deriva la primera hipótesis de trabajo, que, dada la amplitud y la diferente condición de los resultados que permiten contrastarla, hemos operativizado en dos subhipótesis a las que denominamos subhipótesis 1.1 y 1.2 ($sHT_{1.1}$ y $sHT_{1.2}$, respectivamente):

Con los resultados del seguimiento de la fase previa se valora la construcción del conocimiento inicial en un proceso de aprendizaje influido por el cambio metodológico. Los resultados de las respuestas de los estudiantes a las pruebas de la batería de caracterización inicial permiten determinar los conocimientos inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta de enseñanza.

En consecuencia, formulamos de la siguiente manera las dos subhipótesis correspondientes a la primera hipótesis de la investigación:

I.4.1.1. Subhipótesis de trabajo 1.1 ($sHT_{1.1}$)

Al comienzo de la aplicación de la primera propuesta didáctica objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes son, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos. La aplicación de la primera propuesta didáctica favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento y de acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar los procesos termodinámicos de manera científica. Tras la aplicación de la primera propuesta en el aula, los estudiantes demuestran haber avanzado en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

I.4.1.2. Subhipótesis de trabajo 1.2 ($sHT_{1.2}$)

Inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes siguen siendo, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Sin embargo, los alumnos activan esquemas de razonamiento y acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar científicamente los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se verifican progresos significativos en los esquemas y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación inicial.

I.4.2. Segunda hipótesis de trabajo (HT_2)

Como ya indicamos en apartados anteriores, las estrategias de evaluación del aprendizaje deben estar en consonancia con las finalidades de la ciencia escolar: que los estudiantes logren un aprendizaje significativo de conceptos, modelos y procedimientos científicos útiles para interpretar situaciones, hechos y fenómenos del mundo natural, y que adquieran una serie de actitudes y valores que les permitan construir una imagen actualizada de la Ciencia y de la actividad científica (*Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar*, pág. 15). Por este motivo, el modelo de diseño, planificación y desarrollo de las propuestas de enseñanza ensayadas propone una evaluación formativa integrada en el proceso de construcción del conocimiento (*Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la* investigación, pág. 312). Las manifestaciones que elabora el alumnado durante la construcción de conocimiento pueden considerarse en continua retroalimentación con los efectos que se van generando como consecuencia de la interacción con las propuestas de enseñanza. Por esta razón, decidimos basar el seguimiento del aprendizaje en el análisis de las manifestaciones orales y escritas de los alumnos, recopiladas a partir de los materiales de trabajo de éstos y del registro videográfico y de audio de las sesiones de aula.

Para concretar el enunciado de la segunda hipótesis de trabajo, se ha de atender también a las características de los *Sujetos, características y contexto de la muestra* (pág. 265). Como la muestra de la presente investigación es de tipo incidental y ocasional, excluimos toda intención de generalizar los resultados que se derivan de su estudio. En consecuencia, la segunda hipótesis se formula en los siguientes términos:

La aplicación en el aula de la metodología ensayada, favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con la ciencia escolar, que permiten a los estudiantes construir, estructurar y transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos. A lo largo de la aplicación de la segunda propuesta en el aula, los estudiantes avanzan significativamente en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

I.4.3. Tercera hipótesis de trabajo (HT_3)

Para responder al tercer problema de investigación, se determinan los aprendizajes producidos a corto y medio plazo, esto es, recién acabada la intervención en el aula y un cierto tiempo después. Dada la amplitud y diferente condición de los resultados que arrojan las caracterizaciones final y de retención, se han valorado de manera independiente. En cuanto a los resultados de la evaluación final del aprendizaje, son complementarios a los de la segunda propuesta de enseñanza, pero se han evaluado independientemente de éstos porque sus datos de referencia no proceden de la intervención propiamente dicha.

Antes de contrastar los resultados de las baterías de las pruebas final y de retención, se debe comprobar si la muestra ha variado significativamente con el tiempo. Puesto que en esta investigación se produjo una variación en el número de alumnos que se presentaron a ambas caracterizaciones, se hizo necesario verificar si esta diferencia en el número de individuos modificó sustancialmente la muestra. En caso afirmativo, los datos de la caracterización final y los de la retención responderían a las características de muestras distintas, y no tendría sentido realizar el contraste entre ambos conjuntos de datos. Dado el pequeño tamaño de la muestra, se puede comprobar hasta qué punto los casos de muerte muestral producidos alteran los resultados de aprendizaje.

Todas las reflexiones anteriores nos han llevado a operativizar la tercera hipótesis de trabajo en las dos subhipótesis que se formulan a continuación.

I.4.3.1. Subhipótesis de trabajo 3.1 ($sHT_{3.1}$)

Después de la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes activan esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Tras la aplicación de la segunda propuesta en el aula, se verifican progresos significativos en los esquemas de razonamiento y acción y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación anterior a la aplicación de la segunda propuesta didáctica.

I.4.3.2. Subhipótesis de trabajo 3.2 ($sHT_{3.2}$)

Después de un cierto tiempo desde la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes continúan activando esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Los alumnos continúan demostrando competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Existe una permanencia significativa en los aprendizajes realizados, al cabo de un cierto tiempo desde la intervención.

I.5. Plan de trabajo

Una vez establecidas las hipótesis, la siguiente fase de la investigación consistió en establecer el plan de trabajo que permitiría contrastarlas, y que obedece a las exigencias de llevar las propuestas de enseñanza a un contexto real de aula de Ciencias, desde la perspectiva del constructivismo social (Vygotsky, 1964, 1979) y siguiendo las líneas de la Metodología *AcAb* (Domínguez y Pro, 2006). El diseño experimental propiamente dicho se desarrolla en el ***Capítulo II***, y las fases del plan de trabajo se describen a lo largo de los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII***.

I.5.1. Fundamentos del plan de trabajo

Los fundamentos que guían el diseño y la ejecución de este plan están condicionados por diversos factores, entre los que se encuentran nuestra concepción de la Ciencia, nuestra concepción del proceso de enseñanza y aprendizaje de la Ciencia, y las actuales líneas de investigación en Didáctica de las Ciencias. Estos factores se rigen por los principios que se enuncian a continuación:

- ***Sobre la concepción de la Ciencia*** (*Relaciones entre la Ciencia y la ciencia escolar*, pág. 15): El carácter formativo de la Ciencia se debe no solamente a su *corpus* teórico de conocimientos, sino también a su metodología de trabajo y a sus implicaciones sociales. En consecuencia, los contenidos científicos que han de ser objeto de enseñanza y aprendizaje no se limitan a los conceptos y

modelos científicos: también integran procedimientos y actitudes científicas (*TAREA 1.- Selección, organización y secuenciación de los contenidos*, pág. 313).

- ***Sobre la concepción del proceso de enseñanza y aprendizaje*** (*El proceso de aprendizaje en las Ciencias Experimentales*, pág. 27): El aprendizaje es un proceso multivariable y sumamente complejo en el que se interrelacionan tres elementos esenciales: el alumnado, el profesorado y el clima creado en el aula (*Implicaciones para la enseñanza de las Ciencias*, pág. 61). Así pues, para analizar el aprendizaje, el investigador debe tener en cuenta algunas consideraciones globales que le ayuden a no obviar, disociar o sesgar las múltiples interrelaciones existentes:

  - Cada estudiante tiene unas características personales y sociales que influyen decisivamente en su aprendizaje. Entre los factores idiosincrásicos que determinan en gran medida el progreso en la construcción del conocimiento, destacaremos las características intelectuales, la estructura cognitiva y la dimensión afectiva del alumno.

  - Las características idiosincrásicas del profesor, sus concepciones e intereses, condicionan el proceso de enseñanza y aprendizaje y determinan cómo será el modelo de enseñanza que asumirá, implícita o explícitamente.

  - El aula no es meramente un espacio físico donde se desarrollan las tareas docentes, sino que constituye un entorno de comunicación entre los protagonistas del escenario de enseñanza y aprendizaje. En ella interactúan la planificación e intervención docente, las acciones de los estudiantes y la continua influencia del entorno social, de dentro y fuera del contexto escolar. Esta múltiple confluencia de ideas, actitudes y actuaciones crea un clima que establece la dinámica de trabajo en el aula y modela el proceso comunicativo en el que se implican profesor y alumnos, bajo los condicionantes más o menos manifiestos del entorno social.

- ***Sobre las líneas de investigación en Didáctica de las Ciencias*** (*La situación actual de la enseñanza de las Ciencias*, pág. 92): Los contenidos, los objetivos de aprendizaje y la metodología de enseñanza han de mantener una estrecha coherencia entre sí, porque los contenidos que serán objeto de aprendizaje (*TAREA 1.- Selección, organización y secuenciación de los contenidos*, pág. 313) responden a los objetivos que se pretenden conseguir (*TAREA 3.- Selección y formulación de los objetivos de aprendizaje*, pág. 442), a cuya consecución ha de encaminarse la metodología (*TAREA 4.- Selección de las estrategias de instrucción*, pág. 448). La evaluación (*TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje*, pág. 449), distinta de la calificación, debe ser coherente con los principios metodológicos, porque condiciona en gran medida el proceso de enseñanza y aprendizaje, y su influencia se ejerce en el sentido que marcan las finalidades de la ciencia escolar (*Figura 4*, pág. 26).

I.5.2. Fases del plan de trabajo y cronología de la investigación

Sobre la base de los principios enunciados en el apartado anterior, y teniendo en cuenta los requisitos que imponen las hipótesis de la investigación (*Hipótesis de la investigación*, pág. 253), se plantea el plan de trabajo que guía el desarrollo de la Tesis. Este plan de trabajo consta de las siguientes fases:

- ***Fase 1***. Preparación de la parte experimental
  - Se identifican los problemas de investigación.
  - Se revisa la literatura científica.
  - Se planifica la unidad didáctica *Termoquímica*, que se va a utilizar para la acomodación de profesor y estudiantes a la metodología que se pretende analizar.
  - Se planifica la unidad didáctica *Termodinámica Química*, cuyo análisis constituirá el estudio de la metodología a ensayar.
  - Se diseñan los materiales didácticos y los instrumentos de evaluación, así como las estrategias de intervención.
  - Se selecciona la muestra experimental.
- ***Fase 2***. Puesta en práctica de la unidad didáctica *Termoquímica* (fase de acomodación a la metodología)
  - Se aplica en el aula la unidad *Termoquímica*, para la acomodación de profesor y estudiantes a la metodología que se va a ensayar. Se aplican también los instrumentos seleccionados para su seguimiento: la recopilación de los materiales de trabajo de los estudiantes como resultado de sus producciones escritas, y el registro videográfico y de audio de las manifestaciones orales, resultado de la argumentación en pequeño grupo y en grupo de clase durante la intervención.
- ***Fase 3***. Puesta en práctica de la unidad didáctica *Termodinámica Química* (fase de intervención)
  - Se aplican las pruebas de caracterización inicial, sobre los contenidos conceptuales y procedimentales del desarrollo de la unidad Termoquímica.
  - Se aplican en el aula la unidad didáctica *Termodinámica Química* y los instrumentos seleccionados para su seguimiento (los mismos que se utilizaron en la ***Fase 2***): la recopilación de los materiales de trabajo y el registro videográfico y de audio de las manifestaciones orales de los estudiantes.
  - Se aplican las pruebas finales y de retención, sobre determinados contenidos conceptuales y procedimentales.

- Para disponer de más información sobre cómo percibieron los alumnos las propuestas ensayadas, se entrevistó a los alumnos de la muestra. Con la finalidad de indagar en su desempeño general en lo declarativo, lo procedimental y lo axiológico en las distintas materias que estudiaron durante el curso, también se realizaron entrevistas a los padres que se mostraron voluntarios y a varios profesores que conocían bien las características personales de estos estudiantes.

- ***Fase 4***. Análisis de resultados, establecimiento de conclusiones y contraste de las hipótesis de trabajo

  - Se analiza el seguimiento de las manifestaciones escritas y orales de los estudiantes durante la aplicación de la unidad didáctica *Termoquímica*. Se analizan los resultados de las pruebas iniciales. A partir de éstos, se establecen conclusiones sobre la primera hipótesis de trabajo (HT_1).

  - Se analiza el seguimiento de las manifestaciones escritas y orales de los estudiantes durante la aplicación de la unidad didáctica *Termodinámica Química*. A partir de los resultados obtenidos, se establecen conclusiones sobre la segunda hipótesis (HT_2).

  - Se analizan los resultados de las pruebas finales y de retención. Se contrastan los resultados de las pruebas finales e iniciales, por un lado, y de las finales y las de retención, por otro. A partir de ellos, se establecen conclusiones sobre la tercera hipótesis de trabajo (HT_3).

  - Se establecen las conclusiones generales de la investigación.

Existe una relación directa entre las fases del plan de trabajo y las etapas que (Tuckman, 1978) considera claves en la investigación. Esta relación se recoge en la *Figura 6* (pág. 262), acompañada de una sinopsis gráfica sobre el desarrollo cronológico del plan de trabajo, y de unas referencias temporales que indican cómo se refleja la cronología de la investigación en la ordenación capitular de la Memoria.

La organización de la Memoria en función de las fases de (Tuckman, 1978) data del comienzo mismo de la investigación. Esto supone una gran ventaja y un gran inconveniente a la hora de redactar: por un lado, ayuda a que la estructura del texto sea consistente, ordenada y sistemática; pero los primeros apartados que se escriben han de revisarse bastante tiempo después, si se pretende incluir las nuevas aportaciones que van apareciendo en la literatura del área. Para que la lectura ordenada de la Memoria proporcione al lector una imagen más precisa de cómo se desarrolló la investigación, se ha optado por conservar en lo posible la redacción original de los apartados más antiguos de la Tesis, e insertar en ella las publicaciones más recientes, de manera que no se pierda de vista qué contribuciones teóricas son suplementarias al texto principal, por ser posteriores a las que sirvieron de fundamentación a este trabajo.

En cuanto a la cronología de la investigación, destacaremos que el trabajo de Tesis comenzó en septiembre de 2007. La planificación de la intervención en el aula se ultimó con el profesor colaborador en septiembre de 2008, y las fases experimentales se desarrollaron entre febrero y mayo de 2009. El análisis de los resultados de aprendizaje se iba a realizar, en un principio, por esquemas de razonamiento y acción; pero la publicación de los resultados de PISA 2009 (OCDE, 2009b) inspiró el diseño del análisis del aprendizaje por competencias. Problemas ajenos a la investigación obstaculizaron el desarrollo de la misma, y la autora se vio obligada a postergar el trabajo de Tesis hasta finales de 2012. A lo largo de 2013 se completó el análisis de los datos, que había quedado inconcluso. La etapa de redacción no se pudo completar hasta 2015, debido a nuevas dificultades de índole personal, no relacionadas con la investigación.

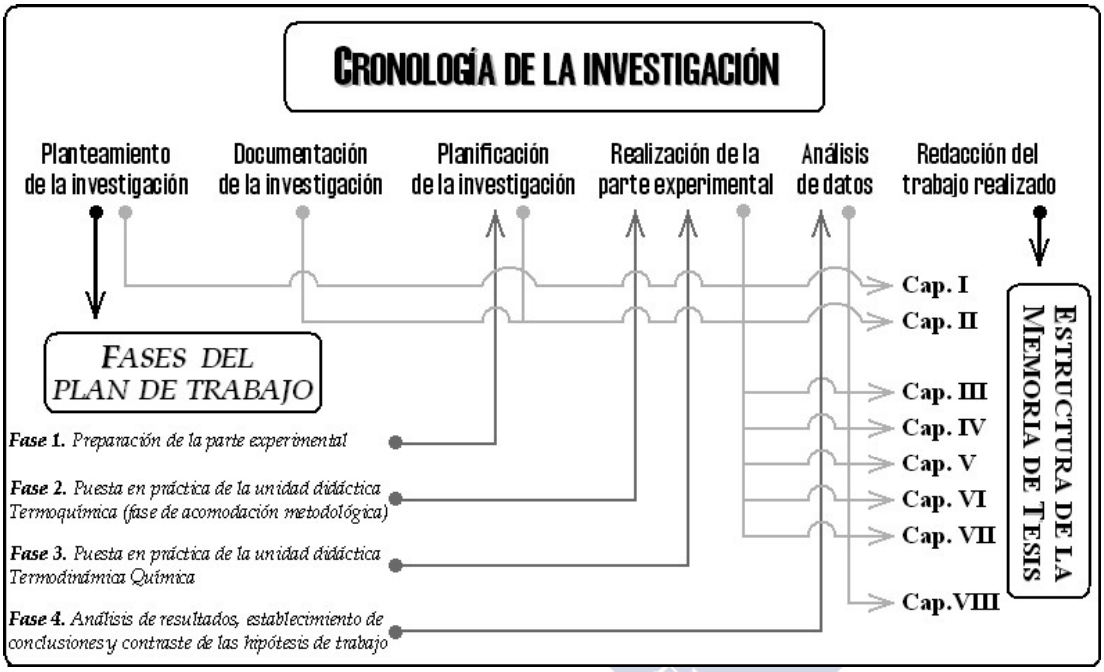


Figura 6: relaciones que guardan las fases del plan de trabajo con la cronología de la investigación y con la ordenación capitular de la presente Memoria de Tesis

Con estas reflexiones se da por terminado el capítulo dedicado a exponer el marco teórico de la investigación, y se pasa a detallar y justificar la estrategia que se ha seguido para diseñarla, planificarla y desarrollarla en un entorno real de aula.

II. Estrategia de investigación

En este capítulo se describe y justifica la estrategia de la investigación, a lo largo de los siguientes apartados:

Sujetos, características y contexto de la muestra (pág. 265). Se describen las características de los alumnos integrantes de la muestra de investigación.

Diseño experimental (pág. 274). Se hace explícito el diseño experimental de la investigación, a partir de las exigencias que se derivan de las hipótesis de trabajo. Se declaran los *Condicionantes del diseño experimental* (pág. 274) y se hacen explícitas las *Fases del diseño experimental* (pág. 281).

Variables implicadas en la investigación (pág. 286): se enuncian y describen la *Variable independiente: la metodología de enseñanza* (pág. 289) y las *Variables dependientes e intervinientes* (pág. 287). Dada la importancia de la variable independiente, ésta se describe en tres apartados:

Fundamentos de la metodología (pág. 290). Se dedican varios apartados a exponer los fundamentos metodológicos que inspiran las dos propuestas de enseñanza objeto de investigación: los tipos de conocimiento cuyo aprendizaje se fomenta (*Los conocimientos deseables desde la ciencia escolar*, pág. 291), el papel que juegan los actores y elementos que intervienen en el *El escenario de enseñanza y aprendizaje (organización del aula)* (pág. 293), y, por último, aquellas recomendaciones legislativas que consideramos de mayor interés para diseñar y planificar las propuestas, debido a la conexión que mantienen con la naturaleza de la Ciencia, con sus implicaciones didácticas y su carácter formativo, y con los contenidos objeto de enseñanza y aprendizaje (*Los referentes legislativos*, pág. 310).

Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la investigación (pág. 312). Se describe el diseño, la planificación y el desarrollo de las dos propuestas de enseñanza, de acuerdo con el modelo que se eligió como referente. Este modelo (Sánchez y Valcárcel, 1993; Domínguez Castiñeiras, 2000) consta de las cinco etapas que se enumeran a continuación:

TAREA 1.- Selección, organización y secuenciación de los contenidos (pág. 313),

TAREA 2.- Problemática de aprendizaje y de enseñanza de los contenidos (análisis didáctico del contenido deseable) (pág. 414),

TAREA 3.- Selección y formulación de los objetivos de aprendizaje (pág. 442),

TAREA 4.- Selección de las estrategias de instrucción (pág. 448),

y *TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje* (pág. 449).

Descripción de las secuencias de actividades Termoquímica y Termodinámica Química (pág. 474). En este apartado se procede a describir y justificar las actividades que conforman las secuencias *Termoquímica* (Descripción de las actividades de la secuencia *Termoquímica*, pág. 475) y *Termodinámica Química* (Descripción de las actividades de la secuencia *Termodinámica Química*, pág. 534), objeto de estudio.

II.1. Sujetos, características y contexto de la muestra

El objetivo de esta investigación, que constituye un estudio de caso, era poner en práctica las dos unidades didácticas *Termoquímica* y *Termodinámica Química* en un contexto natural de enseñanza y aprendizaje. Por este motivo, no se aplicaron técnicas de muestreo para seleccionar unos participantes que garantizaran la representatividad de la muestra. Al contrario: se tomó, sin previa selección del alumnado, el conjunto de una clase de 2º curso de Bachillerato tal y como estaba en la carga docente del profesor que colaboró en la investigación. En consecuencia, la muestra es de tipo incidental y ocasional, no representativa, y responde a nuestro propósito de comprobar los efectos de la aplicación de la metodología ensayada en un entorno real de aula.

La muestra estudiada está constituida por el grupo de alumnos del I.E.S. *Fernando Esquío* (Neda, comarca de Ferrolterra) que en el curso 2008-2009 se matricularon en la asignatura de Química de 2º de Bachillerato. Se trata de once estudiantes (cinco varones y seis mujeres) de edades comprendidas entre los 17 y los 18 años de edad. Los integrantes de la muestra no constituían un grupo de clase completo, sino que eran el subconjunto que cursaba Química dentro del grupo 2º A. Estos 11 alumnos son los únicos del centro que eligieron la modalidad de Ciencias de la Naturaleza y la Salud; sus compañeros de 2º A estaban incritos en la modalidad de Ciencias Sociales (que tuvo 22 matriculados). La modalidad de Tecnología contó con 9 estudiantes. En el *Fernando Esquío*, único centro público de Neda, se contabilizaron en 2008-2009 un total de 42 alumnos de Bachillerato.

Ningún alumno de la muestra había participado previamente en investigaciones didácticas ni había trabajado previamente en un entorno de aprendizaje similar al que se propone en la metodología ensayada o en otras metodologías constructivistas.

El pequeño tamaño de la muestra limita el alcance de la investigación, porque impone una serie de restricciones al tratamiento y a la interpretación de los datos, lo cual, entre otras cosas, impide generalizar los resultados. Pero el planteamiento de esta Tesis siempre fue el de un estudio de caso, y en tales condiciones una muestra como ésta no constituye un obstáculo. Además, el hecho de disponer de un reducido número de participantes ha proporcionado la gran ventaja de un entorno fácil de monitorizar para hacer un seguimiento de la evolución de los esquemas de pensamiento de todos los alumnos y para testar la validez del análisis del aprendizaje por competencias, porque los datos se pudieron someter a un proceso de validación que habría resultado mucho más difícil y laborioso si una muestra hubiera tenido un mayor tamaño (***Capítulo VIII***).

La utilidad de esta muestra en la validación del análisis por competencias se debe también al entorno en el que se produjo el aprendizaje: los once alumnos habían estudiaban Química como una asignatura optativa, así que cabe suponerse que no la eligieron contra su voluntad, y trabajaban con un profesor al que ya conocían desde hacía tres años y medio, en un centro educativo de dimensiones reducidas y situado en un contexto de relativa estabilidad sociocultural en la época en que se desarrolló la parte

experimental de la investigación. Estas características de la muestra (su pequeño tamaño y su estabilidad sociológica) minimizan los sesgos debidos a la inestabilidad muestral y facilitan el trazado de las pérdidas de significatividad por causas ajenas al proceso de aprendizaje: si algún individuo se "cayera" de la muestra, los investigadores podrían detectar fácilmente los motivos.

En resumen, para la investigación se eligió un entorno en el que fuera fácil controlar o aislar cualquier variable que pudiera causar mortalidad muestral no relacionada con el proceso de construcción del conocimiento que se realizó en el aula.

El docente que implementó las dos propuestas de enseñanza ensayadas es Rodrigo Montes Rodríguez, profesor de educación secundaria que impartía en el *Fernando Esquío* la asignatura optativa de Química en 2º de Bachillerato durante el curso académico 2008-2009, en el que tuvo lugar la intervención. Todos los alumnos de la muestra habían recibido clase de Física y Química de 1º de Bachillerato con otro profesor; pero Rodrigo llevaba más de cinco años impartiendo las asignaturas de Física y Química correspondientes a 3º y 4º de ESO y, por ello, ya conocía las características personales, académicas y familiares de estos estudiantes.

La autora de la Tesis conocía personalmente la labor docente de Rodrigo, por haber sido su alumna de Química en 2º de Bachillerato en el curso 1998-1999. Así pues, la investigadora puede afirmar que ya en aquella época el profesor introducía nuevas metodologías que demostraban eficacia frente a la enseñanza tradicional. Se preocupaba por conocer las ideas con las que los alumnos llegaban a clase, desarrollaba las interacciones CTS de los contenidos y ponía un empeño personal en que los estudiantes diseñaran las prácticas de laboratorio en lugar de seguir una "receta de cocina"; su perfil docente no era distinto en 2º de Bachillerato, aun con la temporalización condicionada por las PAAU. De hecho, la autora de esta Memoria recuerda que el primer diseño de una experiencia de laboratorio que realizó en su vida (el estudio cinético de la reacción química entre magnesio y ácido clorhídrico), fue con la ayuda de Rodrigo.

Asimismo, Rodrigo Montes Rodríguez había realizado en los años 90 algunos cursos de doctorado en el Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Universidad de Santiago de Compostela.

La relación personal entre la investigadora y el profesor colaborador favoreció mucho el desarrollo de la parte experimental de esta Tesis, porque antes de la implementación y durante la misma, ambos se reunieron regularmente en el aula de laboratorio con el propósito de intercambiar ideas e impresiones y de acordar diversos puntos que incidían sobre el desarrollo de las propuestas. Estas reuniones aportaron un gran dinamismo a la intervención y motivaron al docente y la investigadora a optimizar en todo momento el trabajo que se iba completando. Rodrigo, por su parte, afirma que el contacto con la nueva metodología ha contribuido a enriquecer sus conocimientos sobre la práctica docente, además de proporcionarle una grata experiencia personal. Yo,

investigadora y autora de esta Memoria, también guardo muy buen recuerdo de esta colaboración, que, además de hacer menos fatigosa la etapa de recogida de datos, sirvió de ayuda para afinar la adecuación de las actividades a un escenario real de aula.

En cuanto a las características del entorno socioeconómico y cultural del que proceden los alumnos de la muestra, el I.E.S. *Fernando Esquío* está situado en la comarca de Ferrolterra (noroeste de la provincia de Coruña), en el municipio de Neda y a menos de un kilómetro del puente que separa este ayuntamiento del de Narón. El alumnado del centro procede mayoritariamente de Neda (en la muestra que nos ocupa, 6 de 11 estudiantes), Narón (en este caso, solamente 1 de 11) y la localidad rural de San Sadurniño (4 de 11). Los estudiantes suelen ingresar en el I.E.S. al cursar 1º de ESO, y terminan allí la enseñanza secundaria; los pocos que se incorporan al centro en el inicio de los estudios de Bachillerato proceden del C.P.R. Jorge-Juan de Narón o del C.P.I. San Sadurniño, del municipio del mismo nombre.

El *status* socioeconómico de Neda y Narón se define como de nivel medio, aunque la evolución de estos dos ayuntamientos ha sido bastante dispar en las últimas décadas. El nivel socioeconómico de San Sadurniño es menor, y la localidad está poco comunicada con el entorno urbano de los otros dos municipios.

En el núcleo urbano de Neda, un porcentaje significativo de la población trabaja como asalariada en la Administración Pública o en pequeñas y medianas empresas privadas. El número de familias que regentan una empresa familiar es relativamente bajo, si se omite el porcentaje de personas dedicadas a la actividad comercial. En el momento en que se realizó la parte experimental de la investigación (2008-2009), el ayuntamiento nedense comenzaba a resentirse de los primeros efectos de la crisis mundial, que venían a sumarse a los de la depresión económica y laboral que ya llevaba varios años afectando a toda la comarca debido a la desindustrialización de la zona y a los crecientes problemas del sector naval, núcleo de la actividad mercantil en Ferrol y alrededores. La serie histórica de los datos poblacionales (www.neda.es) muestra que la población de Neda sufre desde los años 50 un acusado descenso en el número de habitantes: desde los aproximadamente 9 200 censados con los que contaba a mediados del siglo XX, las cifras han caído hasta los 5 700. La tasa de desempleo en el municipio, a mediados de la década de los 2000, fluctuaba alrededor del 15%.

Por el contrario, la evolución poblacional de Narón en el último siglo fue espectacular: de municipio rural con 8 000 habitantes a comienzos del siglo XX, pasó a convertirse en el octavo municipio más poblado de Galicia, con más de 37 000 habitantes a comienzos de 2009 (INE, 2009). Este extraordinario crecimiento se explica por el auge de la actividad empresarial en la zona (el polígono de Río do Pozo, por ejemplo, atrajo más de 7 000 empleos) y sobre todo por la reciente expansión del sector de la construcción, que antes de estallar la crisis alcanzaba unas 1 000 licencias por ejercicio (www.naronconcello.org). El reciente pinchazo de la burbuja inmobiliaria frenó el

crecimiento del municipio, y las consecuencias de la crisis han generado cierres masivos de las pequeñas empresas locales y la marcha de buena parte de la población que se había asentado en Narón durante la época del *boom* inmobiliario.

Las secuelas socioeconómicas más graves recaen sobre el municipio rural de San Sadurniño, que ya venía arrastrando desde hace décadas una discreta depresión demográfica (www.sansadurnino.es). En este municipio, de población envejecida y 3 000 habitantes, las actividades económicas mayoritarias son la agrícola y la ganadera; muchas familias trabajan en pequeñas explotaciones agropecuarias, y un buen número de ellas vive de los subsidios agrarios.

En consonancia con los datos demográficos de la zona y debido a la reciente apertura de dos nuevos I.E.S. en municipios colindantes a Neda, se observa que a lo largo de la última década ha descendido notablemente el número de alumnos matriculados en el *Fernando Esquío*. En el curso académico 1995-1996, cuando la autora de esta Memoria ingresó en este centro para cursar 3º de ESO, se matricularon en él unos 550 alumnos; en 2008-2009, cuando se realizó la intervención en el aula, solamente había 266 estudiantes.

En la zona también se observa un descenso significativo en el porcentaje de alumnos del I.E.S. que se presenta a las pruebas de acceso a la Universidad, al tiempo que se incrementa la proporción de estudiantes que accede a los Ciclos de Formación Profesional. De los 16 alumnos del Fernando Esquío presentados a las PAAU en el curso 2008-2009, aprobaron 14 (13 en junio y 1 en septiembre) y entre ellos se contaron 5 de los 11 integrantes de la muestra objeto de investigación (Ana, Alfonso, Benito y Darío en junio, y Brais, en septiembre).

La *Tabla 3* (pág. 269) recopila algunos datos sobre los once alumnos objeto de estudio, incluyendo la edad y el sexo, los nombres ficticios con los que se los designa en la Tesis, y las materias optativas que cursaban cuando tuvo lugar la intervención.

Ocho de estos estudiantes llevaban más de cinco años en el *Fernando Esquío*, mientras que, para Brais, Clara y Darío, 2008-2009 era su segundo curso en el centro. Cuatro de los alumnos (Berta, Adela, Diana y Clara) habían repetido algún curso anterior, y una de ellas, Adela, era repetidora de 2º de Bachillerato. La instrucción previa de un estudiante suele obligar a la eliminación de sus datos del estudio muestral; pero esta chica sufría una enfermedad metabólica que dificultaba su aprendizaje. Por ello, y porque el pequeño tamaño de la muestra daba la posibilidad de rastrear la influencia de las ideas de Adela en la evolución de las de sus compañeros, se decidió no excluirla de la muestra, sino aislar sus resultados hasta comprobar si su instrucción previa determinaba un nivel de conocimientos significativamente superior al de sus compañeros (*Instrumentos y estrategias de análisis y evaluación del aprendizaje*, pág. 455).

Obsérvese que de los once estudiantes de la muestra, solamente dos alumnas cursas las materias de Física y Matemáticas, en las que se constata una drástica disminución en el número de matriculados debido a la optatividad (Solbes, 2011).

Tabla 3: datos relevantes de los alumnos de la muestra

ALUMNO	Sexo (Hombre/ Mujer)	Edad (años)	Años en el centro	Repetidor en…	Materias optativas	Municipio de residencia	Hermanos (estudios/ profesión)	Profesión del padre	Profesión de la madre
Débora	M	17	6 años 1º ESO	-	Biología y CCs de la Tierra	Neda	-	Trabajador agropecuario	Labores domésticas
Darío	H	17	2 años 1º Bach.	-	Biología y CCs de la Tierra	S. Sadurniño	1 hermana mayor (enfer-mera)	Propietario de comercio	Propietaria de comercio
Diana	M	17	7 años 1º ESO	1º ESO	Física y Matemáticas	Neda	-	Empleado administrativo	Labores domésticas
Clara	M	18	2 años 1º Bach.	1º Bach.	Biología y CCs de la Tierra	S. Sadurniño	-	-	Labores domésticas
Carlos	H	18	6 años 1º ESO	-	Biología y CCs de la Tierra	Neda	1 hermano menor (ESO)	Repartidor de Correos	Repartidora de Correos
Berta	M	18	7 años 1º ESO	3º ESO	Biología y CCs de la Tierra	S. Sadurniño	-	En paro (sector agropecuario)	Labores domésticas
Benito	H	17	6 años 1º ESO	-	Biología y CCs de la Tierra	Narón	1 hermano menor (ESO)	-	Labores domésticas
Brais	H	17	2 años 1º Bach.	-	Biología y CCs de la Tierra	S. Sadurniño	-	Profesor de secundaria	Profesora de secundaria
Adela	M	18	7 años 1º ESO	2º Bach.	Física y Matemáticas	Neda	-	Profesional cualificado	Enfermera
Alfonso	H	17	6 años 1º ESO	-	Biología y CCs de la Tierra	Neda	-	Operario industrial	Labores domésticas
Ana	M	18	6 años 1º ESO	-	Biología y CCs de la Tierra	Neda	1 hermana mayor (enfermera)	Profesional cualificado	Labores domésticas

Aunque algunos de los datos de la *Tabla 3* (pág. 269) proceden de la información aportada por el profesor colaborador en la investigación, la mayoría se ha extraído de las entrevistas que se realizaron, una vez finalizada la intervención, a los alumnos, a los padres de éstos y a once docentes del Centro (*Instrumentos y estrategias de recogida y tratamiento de la información*, pág. 449).

En cuanto a los datos sobre los progenitores de los estudiantes, solamente 2 (ambos varones) de los 22 totales no facilitaron información sobre su actividad laboral. Menos de la mitad de las madres trabajaban (4 de 11), pero de las 7 sin empleo, ninguna afirmaba estar en situación de desempleo: todas definían su actividad como "labores domésticas". Del total de once padres (varones), uno se encontraba desempleado. Dado que no es objetivo del presente trabajo analizar si existe alguna relación entre el nivel de estudios de los progenitores y el rendimiento académico de los estudiantes, no se indagó en estos datos.

Ningún alumno causó baja oficial en el Centro durante el transcurso de la investigación. Sin embargo, se observó que algunos de ellos (Carlos, Berta, Diana y Débora), iban desarrollando una clara tendencia hacia el abandono escolar, con un creciente número de faltas de asistencia a las sesiones de clase, tanto de Química como de otras asignaturas. Como estas manifestaciones de absentismo escolar podrían repercutir en los resultados de la investigación, hemos considerado necesario analizar con detalle los efectos de la inasistencia sobre el aprendizaje (***Capítulo VIII***).

La primera fila de la *Tabla 4* contabiliza el número de faltas de asistencia que el profesor de Química notificó durante el curso a los padres de cada alumno, y en la segunda fila se recoge el número de faltas que los padres justificaron de manera documental. Los datos de la *Tabla 4* se refieren al total de las horas lectivas de la materia (116 horas, 29 semanas de clase), pero no responden al número real de inasistencias de los estudiantes, porque el docente no anotaba aquéllas que obedecían a causas de fuerza mayor (revisiones médicas, asuntos personales o familiares de importancia excepcional…) y de las que se le avisaba con antelación. Rodrigo no pretendía registrar con total exactitud el número de sesiones en las que participó cada alumno, sino informar a los padres en caso de que un estudiante se ausentara reiteradamente de las clases. Por ejemplo, según los datos de la *Tabla 4*, ni Brais ni Benito faltaron un solo día a clase de Química en todo el curso; pero, durante la fase de intervención, el primero no fue dos clases, y el segundo se perdió una sesión de trabajo.

Tabla 4: número de faltas de asistencia notificadas por el docente, y número de faltas justificadas por los padres de los alumnos, para el total de las sesiones de Química (116 horas)

ALUMNO	**Ana**	**Alfonso**	**Adela**	**Brais**	**Benito**	**Berta**	**Carlos**	**Clara**	**Diana**	**Darío**	**Débora**
Nº FALTAS	0	0	16	0	0	23	23	0	16	0	30
Nº JUSTIF.	0	0	6	0	0	5	6	0	5	0	4

Según la información de la *Tabla 4*, 5 de los 11 alumnos de la muestra faltaron a más del 10% de las clases, dato llamativo si se tiene en cuenta que ninguno vivía muy lejos del centro educativo y todos contaban con algún medio de transporte familiar (de hecho, ninguno utilizaba el transporte escolar). El número de inasistencias justificadas por

los padres no llega en ningún caso al 50% de las totales (ni siquiera al 40%), así que podemos afirmar que casi la mitad de los estudiantes se ausentaba sistemáticamente a las sesiones de Química. El caso de absentismo más grave es el de Débora, que sólo se presentó al 26% de las clases, y no aportó documento justificante para más de un 13% de las faltas. De entre los alumnos con cierta tendencia a ausentarse, el caso más leve fue el de Adela, que no asistió al 14% de las clases de Química; sus padres justificaron el 38% de sus inasistencias.

El número total de sesiones que duró la parte experimental de la Tesis es de 26, repartidas de la siguiente manera: 12 se ocuparon en el desarrollo de la fase previa, 1 se dedicó al examen tradicional (que ya estaba previsto antes de implementarse la parte experimental de la investigación), 2 fueron para las pruebas de caracterización inicial, 8 se dedicaron a la fase de intervención, y se destinaron 2 a los *post-test*, una para las pruebas de caracterización final y otra para la retención.

La *Tabla 5* contiene el número total de faltas de asistencia durante la parte experimental, incluyendo las pruebas de caracterización inicial, final y de retención. No se recoge el número de inasistencias justificadas por los padres, porque el propósito de la *Tabla 5* es dar al lector una idea preliminar del impacto que tuvieron las faltas de asistencia en el aprendizaje. En los capítulos correspondientes a los resultados de las fases previa (***Capítulo III***) y de intervención (***Capítulo V***), se detallan los efectos de la inasistencia en el proceso de construcción del conocimiento (ver también ***Capítulo VIII***).

*Tabla 5: número de faltas de asistencia observadas durante las fases previa (**Fp**) y de intervención (**Fi**), e indicación de asistencia (sí) o no asistencia (no) a las pruebas de caracterización inicial (**Ci**), final (**Cf**) y de retención (**Rt**)*

ALUMNO	**Ana**	**Alfonso**	**Adela**	**Brais**	**Benito**	**Berta**	**Carlos**	**Clara**	**Diana**	**Darío**	**Débora**
Nº Faltas *Fp*	0/12	1/12	2/12	1/12	0/12	2/12	2/12	1/12	3/12	0/12	5/12
Nº Faltas *Fi*	0/8	2/8	1/8	2/8	1/8	4/8	5/8	0/8	2/8	0/8	7/8
Asistencia a *Ci*	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	no
Asistencia a *Cf*	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	no
Asistencia a *Rt*	sí	sí	sí	sí	sí	no	no	sí	sí	sí	no

Solamente dos alumnos, Ana y Darío, asistieron puntualmente a todas las sesiones. Alfonso, Brais, Benito, Adela y Clara apenas se ausentaron. Los datos de los otros cuatro alumnos requieren una interpretación individualizada, y para comprobar si la asistencia de estos estudiantes durante la implementación de la metodología ensayada

fue sustancialmente distinta a la del curso de Química en su conjunto, en la *Tabla 5* se comparan los datos de las dos tablas anteriores; los resultados se expresan en porcentaje de faltas de asistencia. Para calcular el porcentaje correspondiente a la fase experimental de la Tesis, se han recontado todas las inasistencias, las justificadas y las no justificadas; el cálculo del porcentaje a lo largo del curso se basa en los datos que Rodrigo facilitó a la investigadora, y que, como se ha indicado, no representan el cómputo total de faltas.

Tabla 6: estudio comparativo de las faltas de asistencia de Carlos, Berta, Diana y Débora entre el total del curso de Química y la fase experimental de la Tesis

ALUMNO	**Berta**	**Carlos**	**Diana**	**Débora**
% faltas curso	20%	20%	14%	26%
% faltas fase experimental	30%	35%	25%	60%

Solamente se confirma la existencia de un caso claro de absentismo relacionado con la fase experimental de la investigación, y es el de Débora: su inasistencia a la implementación de las propuestas ensayadas es notablemente superior a la media del curso académico, y el porcentaje de ausencia en la fase de intervención es superior al 80%; además, no se presentó a ninguna de las pruebas de caracterización. Sin embargo, por las razones que se indican a continuación, podemos descartar que su tendencia al absentismo a las clases de Química se deba a un rechazo hacia la nueva metodología:

En las entrevistas a varios profesores del centro (entre los cuales se encontraba la tutora de este grupo de 2º de Bachillerato), éstos declararon que esta alumna comenzó el curso asistiendo con regularidad a las clases, y que llegado un cierto momento fue abandonando prácticamente todas las materias. En opinión de los docentes, la asistencia de Débora decreció como consecuencia de dos hechos clave: primero, porque recibió unas calificaciones muy desfavorables en la primera evaluación; segundo, porque a mediados de febrero obtuvo también calificaciones bajas en los exámenes parciales de la segunda evaluación. Su perfil de asistencia durante las sesiones que duró la parte experimental de la investigación muestra que dejó de presentarse en el aula justo después del festival de Carnaval del centro, a finales del mes de febrero. Parece, pues, que la actitud de Débora se vio muy afectada por el desánimo de haber recibido una mala calificación en la primera evaluación y otra en el comienzo de la segunda.

Pero, según el testimonio de los docentes entrevistados, en la actuación de Débora influyó también otra circunstancia:

Esta alumna sufría una lesión crónica de espalda, por lo que tenía la posibilidad de entrar en el cupo de las plazas reservadas para minusválidos en el acceso a las carreras universitarias. Así, con una plaza de Universidad asegurada sin tener por qué superar la nota de corte, Débora no sentía necesidad de presentar un gran expediente, y utilizaba

este argumento para justificar ante los profesores sus faltas de asistencia y su escaso esfuerzo en los estudios. Alegaba, además, que su posibilidad de asistir a las clases se veía limitada por los dolores físicos debidos a su lesión. Se pueden formular dos objeciones a este segundo argumento de Débora:

En primer lugar, la actitud de sus progenitores no respalda esta afirmación. Si buena parte de las inasistencias de Débora se debían a problemas de salud, ¿por qué sus padres no informaban a los profesores de estas ausencias por enfermedad? De la asignatura de Química, solamente justificaron 4 de las 30 faltas que Rodrigo registró a lo largo del curso.

En segundo lugar, las actividades de Débora invalidan por completo su argumento. Quizá su lesión crónica, oficialmente valorada como minusvalía, le causara un sufrimiento físico que le impidiera ir con regularidad a clase, sobre todo si se tiene en cuenta que el aula de 2º de Bachillerato y el laboratorio de Física y Química se encuentran en el primer piso (en el edificio hay ascensor). Pero si una persona padece dolores tan intensos que le dificultaban subir a un primer piso, está incapacitada para realizar actividades deportivas; y al mismo tiempo que los dolores de espalda le impedían subir escaleras, Débora practicaba varios deportes (entre ellos la equitación) con total normalidad y con la regularidad de dos veces por semana.

En los datos de Berta también se observa claramente la tendencia al absentismo, pero tampoco por causa de un rechazo hacia la metodología ensayada, y su caso es en cierto sentido opuesto al de Débora:

Su porcentaje de inasistencia, de un 20% a lo largo del curso, no fue atípico durante la fase previa (17%), aunque se disparó al 50% durante la fase de intervención. Esto se debió a las graves dificultades económicas a las que se tuvo que enfrentar su familia después del vendaval que azotó la comarca en febrero, justo cuando comenzaba la parte experimental de esta investigación. Después de varios días de rehabilitación de las instalaciones de la granja, Berta se vio obligada a abandonar las clases y trabajar en el negocio familiar para intentar paliar en lo posible las grandes pérdidas económicas que había causado el vendaval. Después de una ausencia casi total en el mes de marzo, Berta se reincorporó a las clases y continuaría asistiendo con relativa regularidad, aunque, a juicio de los docentes, las malas calificaciones de la primera y la segunda evaluación pesaron bastante en su motivación.

Por su parte, Carlos llegó a faltar a más de la mitad de la fase de intervención. También podemos afirmar que su absentismo no tenía relación con un rechazo hacia la metodología ensayada, porque desde hacía seis años (cuando había comenzado a estudiar en el Instituto) este chico ya tenía la costumbre de faltar sistemáticamente todos o casi todos los días a las dos o tres primeras horas de clase. En más de una grabación de audio de las que se realizaron durante la intervención, alguno de los compañeros recriminaba a Carlos por llegar tarde a clase, y la respuesta de éste era siempre la misma: se había

quedado dormido. Según los profesores entrevistados, el porcentaje de absentismo de Carlos a las materias que se impartían entre las 08.30 h y las 10.10 h, rondaba el 50%. Año tras año, tanto los tutores del curso como varios profesores más informaron de este problema de asistencia a los padres del alumno. Éstos, por su actividad laboral, entraban a trabajar muy temprano y no podían verificar si Carlos o su hermano menor se levantaban de la cama a tiempo para llegar a la primera clase; sin embargo, el hermano de Carlos sí se presentaba puntualmente a las clases. En los seis cursos que Carlos estudió en el centro, los profesores no lograron que sus apercibimientos se tradujeran en cambios significativos en la actitud del alumno ni en su hora de llegada.

Menos acusado fue el absentismo que mostraron durante el curso Adela y Diana. Aunque la segunda faltó al 25% de las sesiones sobre Termoquímica y Termodinámica Química, y los datos de la *Tabla 5* (pág. 271) muestran una tendencia creciente a la inasistencia, ésta tampoco guardó relación con un rechazo a la metodología ensayada: los docentes entrevistados confirmaron que, después de las calificaciones de la primera evaluación, esta alumna dejó de presentarse también a buena parte de las clases de otras materias. En la entrevista realizada a Diana, ella misma manifestó que desde el comienzo de la segunda evaluación estaba segura de no aprobar Química en junio, y que por ese motivo consideraba inútil derrochar esfuerzo en estudiarla durante el curso.

Por parte del entorno del alumnado, existe una aceptación tácita de las reiteradas ausencias a clase, también cuando éstas no son tan frecuentes como las ya comentadas. Como ejemplo puede citarse el caso de Adela: se trata de una alumna cuya inasistencia al conjunto del curso y a la fase experimental de la investigación fue ligeramente superior al 10%. El argumento que aportaron en varias ocasiones los padres de esta chica para justificar las ausencias de su hija a clase era que Adela se encontraba en pleno período de prácticas del carnet de conducir, y que por ese motivo dejaba de asistir a las clases del Instituto.

II.2. Diseño experimental

A continuación se exponen las principales estrategias que se han utilizado para dar respuesta a la problemática planteada, a la cual se ha dedicado el apartado *Planteamiento de los problemas de investigación* (pág. 11). Se hace explícito el diseño experimental de la investigación (*Fases del diseño experimental*, pág. 281), a partir de las exigencias que se derivan de las características de la investigación (*Condicionantes del diseño experimental*, pág. 274):

II.2.1. Condicionantes del diseño experimental

Las características del diseño experimental más adecuado se extraen de los requisitos que imponen los objetivos de la investigación y las hipótesis de trabajo que se pretenden contrastar (*Los objetivos de la investigación y las hipótesis de trabajo*, pág. 275), de

las características iniciales del escenario de enseñanza y aprendizaje (*Las características del escenario de enseñanza y aprendizaje*, pág. 278) y de la influencia del cambio metodológico (*El cambio metodológico*, pág. 279), que condiciona la evolución del escenario.

II.2.1.1. Los objetivos de la investigación y las hipótesis de trabajo

Esta investigación se plantea como un estudio de caso cuyo objetivo es evaluar la idoneidad de dos propuestas de enseñanza científica y didácticamente fundamentadas (*Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la investigación*, pág. 312) para promover una evolución significativa de las formas de pensar y hacer de los estudiantes de un grupo de 2º de Bachillerato, compuesto por los once alumnos que estudiaban la materia de Química en el Instituto público de enseñanza secundaria *Fernando Esquío* de Neda (*Sujetos, características y contexto de la muestra*, pág. 265).

Para lograr este objetivo, se analizan ambas propuestas en términos del aprendizaje que los alumnos desarrollaron a medida que realizaban las actividades.

Cuando hablamos del aprendizaje analizado, nos referimos al aprendizaje significativo del conocimiento relacionado con la Termodinámica de los procesos químicos; y por el conocimiento analizado entendemos el conocimiento funcional, que es útil para explicar hechos, situaciones y fenómenos del mundo natural. Nos interesa averiguar qué saben los alumnos de la muestra, cómo hacen evolucionar sus conocimientos y cómo los llegan a utilizar en la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Teniendo en cuenta estos objetivos de investigación, ha de seleccionarse un diseño experimental que permita determinar la evolución del conocimiento, es decir, el aprendizaje asociado a las propuestas, y comprobar la significatividad del mismo en términos de su estabilidad en el tiempo.

En los *curricula* oficiales se clasifican los conocimientos en tres categorías diferenciadas: conceptos, procedimientos y actitudes. Dado que existe una interrelación y dependencia entre los marcos teórico y metodológico, y que las actitudes se fundamentan en factores cognitivos y procedimentales (*Los objetivos de la investigación y las hipótesis de trabajo*, pág. 275), consideramos que esta diferenciación es más semántica que real, y que atomizar el conocimiento en componentes aisladas supondría ignorar la naturaleza del aprendizaje como un proceso global (Domínguez Castiñeiras, 2007). Por ello, en el diseño experimental incorporamos la idea de dimensión dentro de una concepción global del aprendizaje, y estructuramos el conocimiento en esquemas de razonamiento y esquemas de acción, cuya efectividad ya fue puesta a prueba en investigaciones anteriores (como Domínguez, 2000). La integración de los aspectos conceptuales, procedimentales y axiológicos y el planteamiento integrador del proceso de aprendizaje orientado a la aplicación de los saberes adquiridos también también se demuestran en la evaluación del aprendizaje en términos de las competencias científicas alcanzadas, esto es, la adquisición

de capacidad para utilizar el conocimiento y los procesos científicos en la resolución de cuestiones problemáticas.

Desde la teoría de los esquemas, y aceptando que el conocimiento que se pretende construir integra conceptos, procedimientos y actitudes, podemos considerar que un auténtico aprendizaje supone el establecimiento de esquemas de razonamiento y de acción que permitan al individuo transferir de manera efectiva el conocimiento construido (Domínguez Castiñeiras, Pro, y García-Rodeja, 2003). En consecuencia, podemos dimensionar el conocimiento deseable en esquemas de razonamiento y esquemas de acción. Así se estructuran en dimensiones los razonamientos y las acciones deseables de manera que constituyen los esquemas de conocimiento referenciales de la ciencia escolar (*Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje*, pág. 380). El aprendizaje supondrá una evolución de las estructuras de razonamiento y de acción de los estudiantes en atención a las dimensiones establecidas (*Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento*, pág. 456).

Desde la perspectiva de la competencia entendida como movilización del conocimiento, los alumnos demuestran su nivel de competencia al poner en juego sus conocimientos en diferentes situaciones y contextos (p. ej., Rychen y Salganik, 2003; Cañas, Martín-Díaz, y Nieda, 2007; VV.AA., 2009b). La competencia abarca la articulación y utilización de las capacidades que se adquieren al dominar determinados conocimientos conceptuales, adquirir y consolidar una serie de destrezas y estrategias, y adoptar ciertas actitudes. El aprendizaje supondrá un progresivo avance en las competencias científicas, en función de la potencialidad interpretativa y la potencialidad de activación que los alumnos concedan al conocimiento científico (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, pág. 458).

A partir del marco teórico sobre el aprendizaje (*Revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales*, pág. 14) y del análisis por esquemas de razonamiento y acción (*Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento*, pág. 456) y por competencias (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, pág. 458), se pueden concretar algunos aspectos del diseño experimental de la investigación:

Un diseño experimental más ortodoxo debería contemplar la replicación de pruebas para hacer posible la comparación exacta entre los distintos *tempus* de la investigación. Sin embargo, no es estrictamente necesario, si se tiene en cuenta el marco teórico sobre los esquemas de razonamiento y acción y sobre competencias.

Analizar el aprendizaje por esquemas de conocimiento implica dimensionar el conocimiento científico, y esto nos permite evitar la replicación de las pruebas utilizadas, porque, más allá del contraste *item* a *item*, se podrá identificar qué estructuras de razonamiento y de acción utilizaron los alumnos en sus explicaciones a lo largo de la intervención, y cómo evolucionaron estas estructuras con respecto a las dimensiones establecidas. Así, independientemente de las pruebas utilizadas, cualquier *item* (de las

actividades de las secuencias ensayadas o de las baterías de caracterización de la muestra) contiene información concreta sobre lo que sabe cada estudiante respecto de las dimensiones en las que se ha estructurado el conocimiento deseable (Domínguez Castiñeiras, 2000; Sánchez Piso, 2006; Prado Orbán, 2010).

El análisis del aprendizaje por competencias articula las capacidades de movilización del conocimiento, así que también permite evitar la replicación de las pruebas, porque para distintos *items* se puede identificar cómo evolucionó la potencialidad interpretativa que los estudiantes atribuyeron a los constructos científicos a lo largo de la intervención, y cómo se modificó la potencialidad de activación del conocimiento en las distintas situaciones de aprendizaje (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2012). Cualquier *item* de las actividades o de las pruebas planteadas contiene información concreta sobre el conocimiento que es adecuado movilizar en cada caso y sobre la utilidad concreta con que los alumnos lo activan. Mediante el análisis del aprendizaje por competencias también se puede comprobar hasta qué punto influye la naturaleza de las actividades y las pruebas planteadas sobre la activación de los conocimientos que se pretenden construir, porque el diseño del análisis permite relacionar la potencialidad de activación del conocimiento con el perfil de los *items* seleccionados (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, pág. 458).

En cualquier investigación, los procesos de enseñanza y aprendizaje son tan complejos que no pueden estudiarse en términos de simples relaciones causa-efecto, y las transformaciones de los datos obtenidos generan errores y sesgos que conviene conocer y, en lo posible, evitar o minimizar. El tratamiento de los datos acarrea algunos problemas asociados a pérdidas de información, simplificaciones subjetivas, isomorfismos numéricos sobre una realidad llena de matices… En este estudio de caso, la determinación de los esquemas de conocimiento y de los niveles de competencia de los alumnos exige una transformación bastante compleja de la información extraída del aula (*Instrumentos y estrategias de análisis y evaluación del aprendizaje*, pág. 455). Ateniéndonos a las limitaciones que imponen los métodos de transformación de datos, se pueden analizar los cambios detectados en el conocimiento de los estudiantes, comprobar en qué se relacionan estos cambios con las distintas situaciones de aprendizaje y, como resultado, evaluar las propuestas de enseñanza ensayadas en términos del aprendizaje promovido. Además, estas transformaciones de la información ayudan a profundizar en el diseño experimental e indagar en aspectos tales como la influencia de las características iniciales de los estudiantes sobre la evolución del conocimiento, o la relación que hay entre la información recogida en los materiales de trabajo y los resultados de la investigación.

Con el propósito de contrastar las hipótesis de trabajo, se diseñaron tres baterías de pruebas para caracterizar la muestra en tres momentos clave: inmediatamente antes de la implementación de la segunda propuesta de enseñanza (caracterización inicial ***Ci***), inmediatamente después de ésta (caracterización final ***Cf***), y transcurrido un cierto tiempo desde el final de la intervención en el aula (retención ***Rt***) (*Figura 7*, pág. 282).

Para que se minimice el impacto de la demanda académica y para que los datos extraídos de las pruebas de caracterización obedezcan sobre todo al compromiso continuo de los alumnos con la construcción de conocimiento, diseñamos unas baterías de pruebas que fueran lo menos invasivas posible, teniendo en cuenta el contexto de unos estudiantes que se preparan para los exámenes de Selectividad (*Instrumentos y estrategias de recogida y tratamiento de la información*, pág. 449). Decidimos aplicar baterías de pruebas de corta duración en el tiempo para no alarmar a los estudiantes con un excesivo control de su rendimiento. Si los investigadores manifiestan demasiada insistencia en monitorizar la evolución del conocimiento, corren el riesgo de convertir la intervención en una sucesión interminable de exámenes que quizá llegue a deformar el proceso de aprendizaje y contamine la recogida de información, porque los datos obtenidos en tales circunstancias pueden estar influidos por la presión a la que los alumnos se ven sometidos si quieren obtener buena calificación, o por el aburrimiento que puede generar el excesivo control.

II.2.1.2. Las características del escenario de enseñanza y aprendizaje

Las propuestas de enseñanza objeto de estudio se ensayan en un escenario real cuyas características y respuesta a la nueva metodología determinan el desarrollo del proceso de aprendizaje y, por tanto, condicionan en gran medida los rasgos del diseño experimental. Debe tenerse en cuenta la idiosincrasia del profesor y de los alumnos:

En lo que respecta al docente, ya se ha indicado que la elección de este profesor obedeció a nuestro objetivo de analizar una situación natural de enseñanza y aprendizaje (*Escenario de la investigación*, pág. 10). Pretendíamos que fuera un docente en ejercicio quien desarrollara su papel de guía en el proceso de aprendizaje según la metodología ensayada, utilizando las secuencias de actividades que diseñamos. Como Rodrigo Montes Rodríguez encajaba perfectamente en este perfil, le ofrecimos los instrumentos necesarios para la intervención, y él aceptó.

Las características de la muestra objeto de investigación ya se han descrito (*Sujetos, características y contexto de la muestra*, pág. 265): se trata de una muestra incidental y ocasional, no representativa, que se seleccionó con la pretensión de analizar una situación natural de enseñanza y aprendizaje.

La primera restricción que impone el estudio de esta muestra sobre la estructura de la investigación es la imposibilidad de extrapolar los resultados. Para poder generalizarlos se deberían cumplir varios requisitos que desvirtuarían la esencia de este trabajo investigador, porque repercutirían en el escenario natural de enseñanza y aprendizaje. Entre estas exigencias destacan la selección de una muestra que cubriera las mínimas características de representatividad y el control de una serie de parámetros muestrales que supondrían un mayor intervencionismo investigador en el aula.

Debido al reducido número de individuos estudiados y a nuestra decisión de descartar la utilización de técnicas de muestreo en la elección de sus integrantes, no

podemos garantizar la representatividad de la muestra. Pero, en todo caso, esta investigación se planteó desde el principio como un estudio de caso, con lo que queda de antemano excluida toda intención de generalizar sus resultados.

El hecho de que no se aplicase ningún tipo de selección a los individuos de la muestra no implica que no se caracterizara ésta al comienzo de la intervención. Para definir las condiciones iniciales de los estudiantes, no utilizamos variables relacionadas con *tests* de inteligencia, estadios de desarrollo cognitivo, factores sociológicos o cualquier prueba de este tipo. Las variables que seleccionamos se refieren a los conocimientos de los estudiantes inmediatamente antes de la intervención (*Figura 7*, pág. 282). El análisis sobre lo que sabe inicialmente el alumnado, además de ser una exigencia derivada del diseño experimental, aporta información útil tanto para el diseño de las propuestas didácticas objeto de análisis, como para estructurar el discurso pedagógico atendiendo a los conocimientos de los que aprenden; si se pretende llevar a la práctica un planteamiento metodológico constructivista, antes debe determinarse el conocimiento inicial de los alumnos (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27).

II.2.1.3. El cambio metodológico

Esta investigación implica una modificación metodológica relacionada con la puesta en práctica de una propuesta innovadora. Desde la perspectiva del diseño experimental, los cambios metodológicos actúan sobre el proceso de enseñanza y aprendizaje. Por ello, si se pretende evaluar la influencia de una metodología sobre la evolución de los conocimientos de unos alumnos que no están familiarizados con la nueva dinámica de trabajo, se debe programar un período de acomodación durante el cual el profesor y los estudiantes se habituarán a ella.

Los protagonistas del escenario de enseñanza y aprendizaje pueden estar condicionados por experiencias educativas anteriores cuyos estereotipos, conductas, actitudes y formas de trabajar sean manifiestamente contrarios a los nuevos planteamientos. Por ello, decidimos programar un proceso de acomodación suficientemente amplio para trabajar poco a poco en los nuevos hábitos que exige el cambio metodológico. Este periodo de acomodación metodológica se materializó en la aplicación de *Termoquímica*, la primera de las unidades didácticas (*Figura 7*, pág. 282). De aquí en adelante se denomina fase previa ***Fp*** (o de acomodación a la nueva metodología) a la implementación de la propuesta didáctica *Termoquímica*, porque el objetivo de esta fase del diseño experimental fue minimizar las influencias del cambio metodológico sobre el posterior desarrollo de la unidad *Termodinámica Química*.

La fase de intervención (***Fi***) es la fase del diseño experimental en la que se puede considerar que se han minimizado las influencias del cambio metodológico sobre el proceso de aprendizaje. La fase de intervención se materializó mediante la aplicación de la segunda unidad didáctica, *Termodinámica Química*.

Especialmente en los trabajos como éste, cuya parte experimental es larga en el tiempo y persigue la evaluación de propuestas didácticas, el registro de datos *in situ* es fundamental para ahondar en los mecanismos de evolución del conocimiento y en el grado de efectividad de las propuestas diseñadas para promover aprendizaje. El seguimiento continuo de la intervención en el aula (durante ***Fp*** y ***Fi***) evita que el proceso de aprendizaje se convierta para los investigadores en una caja negra; por este motivo, se realizó un seguimiento continuo del aprendizaje generado con las propuestas ensayadas.

En otras Tesis que se encuadran en la línea de investigación del Departamento (Domínguez Castiñeiras, 2000; Sánchez Piso, 2006; Prado Orbán, 2010), la relación entre los conocimientos iniciales del alumnado y los conocimientos deseables de la ciencia escolar se determinó mediante una batería de caracterización inicial de la muestra constituida por una serie de pruebas sobre el tema objeto de estudio, que se aplicaron en el momento en que se consideró minimizado el impacto del cambio metodológico sobre el aprendizaje. En estas investigaciones no se emitieron hipótesis sobre el aprendizaje que tuvo lugar durante la fase previa, porque el objetivo que se perseguía era analizar la influencia de la segunda propuesta de enseñanza en la evolución de los conocimientos. Con todo, se dedicaron pormenorizadas descripciones a la adaptación de alumnos y docente a la metodología ensayada, para explorar la influencia del periodo de acomodación sobre el posterior desarrollo del aprendizaje.

A diferencia de las citadas investigaciones, la que aquí se presenta sí tenía por objetivo analizar en profundidad el aprendizaje generado bajo la influencia del cambio metodológico, por los motivos que se indican a continuación:

En primer lugar, a lo largo de la aplicación de la propuesta sobre Termoquímica, los alumnos construyeron conceptos y destrezas que son básicos para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. El seguimiento pormenorizado de la fase previa fue útil para indagar en el aprendizaje de los conocimientos sobre los cuales se construyeron los conceptos y destrezas que se trabajaron en la fase de intervención, ahondando en los detalles de las múltiples situaciones de aprendizaje y explorando más finamente las interacciones de los alumnos y del profesor con la metodología propuesta.

En segundo lugar, los estudiantes de la muestra no habían estudiado Termodinámica Química en los cursos previos a 2º de Bachillerato. Era de esperar, pues, que sus ideas previas sobre esta materia serían intuitivas y bastante inconexas entre sí (*Componente cognitiva del aprendizaje*, pág. 35), derivadas del "sentido común" (Wolpert, 1994) y de las formas espontáneas de razonamiento (*Nivel de abstracción, demanda conceptual, manejo simultáneo de variables y construcción de razonamientos complejos en la Termodinámica*, pág. 128), de la cultura social (Jiménez, Analadejo y Caamaño, 1992; Pozo, 1996b) y de los medios de comunicación y otros contextos que pueden reforzar ideas alternativas concordantes con el conocimiento cotidiano (Gómez Crespo, 1996). Se

esperaba que las ideas iniciales de los alumnos sobre Termodinámica Química estuvieran relacionadas con sus concepciones iniciales de la energía, la estructura de la materia y los procesos físicos y químicos, y todos estos contenidos científicos serían objeto de aprendizaje durante la implementación de la propuesta sobre Termoquímica. Por esta razón, se añadió al diseño de la investigación un seguimiento completo del proceso de aprendizaje que tuvo lugar durante la implementación de *Termoquímica*. Así, los resultados del aprendizaje que se produjo en la ***Fp*** proporcionaron suficientes claves para comprobar hasta qué punto los alumnos tenían ideas previas basadas en modelos alternativos de la energía, las transferencias de energía, el enlace químico o la reacción química. Dado que estas ideas ya se manifestarían en la fase previa a la intervención, desaparecería la necesidad de incluir en la batería de caracterización inicial algunas pruebas sobre los conocimientos de los alumnos en Termodinámica Química.

Gracias al seguimiento del aprendizaje generado bajo la influencia del cambio metodológico, se pudo decidir *in situ* si la batería de caracterización inicial debía incluir *items* de Termodinámica Química, o si se podía dar por supuesto que los conocimientos iniciales sobre el tema serían los asimilables a los esquemas básicos que demostraron sobre la energía y sus transferencias, el enlace químico y la reacción química a lo largo de ***Fp***. A la vista de los resultados preliminares del seguimiento de la fase previa, se decidió que la prueba de caracterización inicial sólo incorporaría *items* sobre Termoquímica (***Capítulo IV***). Esto ayudó a que las pruebas de caracterización inicial sirvieran como un simulacro de examen en el que la demanda académica no intervendría de manera determinante, porque el profesor había advertido a los alumnos que la evaluación se basaría, ante todo, en el trabajo diario.

Por otra parte, el seguimiento del aprendizaje influido por el cambio metodológico hace posible la obtención de valiosa información sobre los efectos de la adaptación a la metodología en la evolución posterior del conocimiento. Por esta razón se describieron detalladamente las fases previas de las investigaciones de otras Tesis realizadas en el Departamento (Domínguez Castiñeiras, 2000; Sánchez Piso, 2006; Prado Orbán, 2010). En esta Tesis, el reducido tamaño de la muestra facilitó una exploración detallada de la influencia del cambio metodológico en el proceso de aprendizaje.

El análisis de la fase previa representa una carga de trabajo adicional, pero a cambio ofrece una respuesta más detallada al primer problema de investigación, gracias a la cantidad y calidad de los datos que permite obtener. También contribuye a profundizar en la respuesta al segundo y al tercer problema de investigación, porque facilita información sobre las bases conceptuales, procedimentales y actitudinales con las que comenzó el aprendizaje que se realizó durante la fase de intervención.

II.2.2. Fases del diseño experimental

Partiendo de las reflexiones del apartado anterior, que están fundamentadas en nuestras concepciones del aprendizaje y del conocimiento científico (*Revisión de la*

literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales, pág. 14), el diseño experimental de la investigación se concreta en las fases que se observan en la *Figura 7*.

En síntesis, el diseño experimental de la investigación puede considerarse, según la simbología de Campbell y Stanley (1982), como un diseño de tipo *pretest-postest-postest*, separado, sin grupo de control y *quasi*-experimental.

La ausencia de grupo de control se justifica porque nuestra intención es comprobar que la eficiencia de la metodología ensayada es aceptable con respecto a lo que sería deseable que los estudiantes aprendieran. Desde este punto de vista, nuestro referencial de aprendizaje no es el de un grupo de control (otro grupo de alumnos al que se haya aplicado otra metodología), sino los objetivos de aprendizaje, relacionados con el conocimiento deseable desde el punto de vista de la ciencia escolar y la legislación vigente en materia de educación. La comprensión de un dominio específico es un proceso continuo y multidimensional que se puede caracterizar desde el punto de vista teórico analizando la evolución de las teorías científicas y comparándola con la evolución de las concepciones de los estudiantes (Mortimer, 1995).

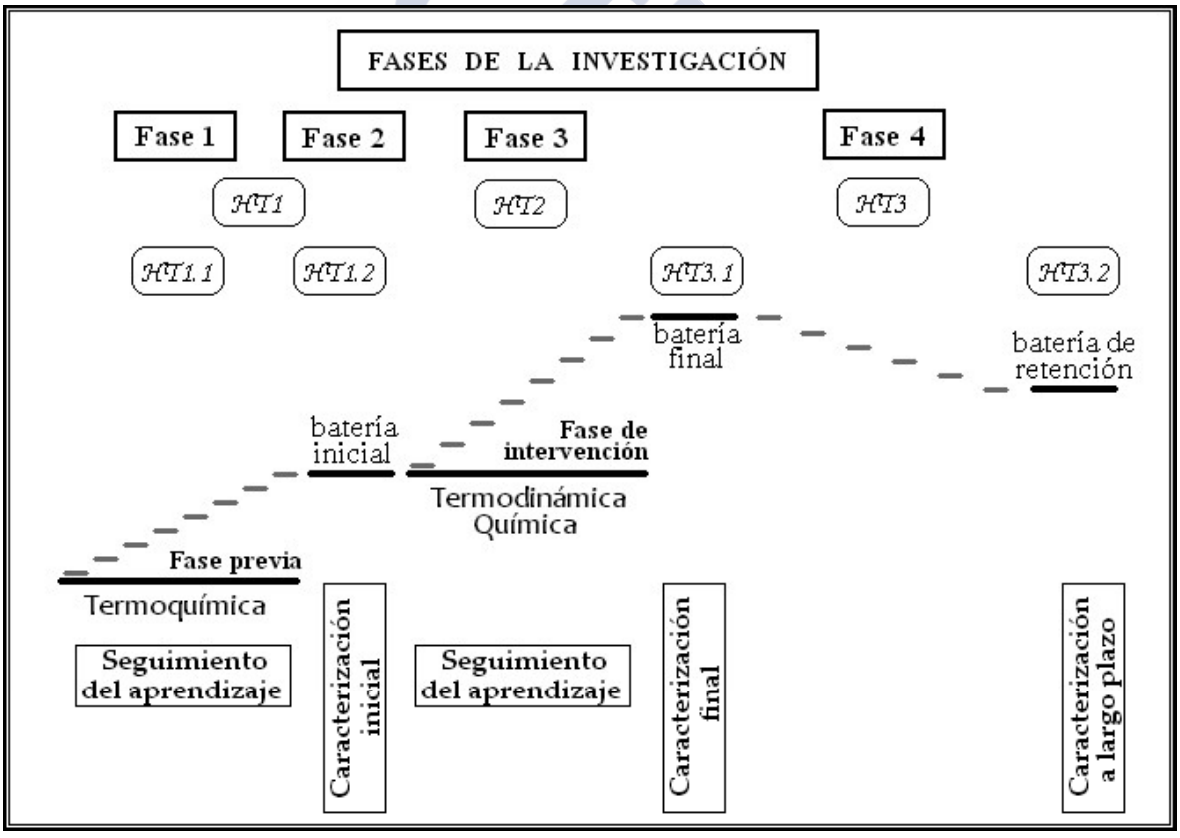


Figura 7: fases del diseño experimental de la investigación

El diseño experimental de la investigación incluye tres caracterizaciones de la muestra, que tienen por finalidad evaluar los conocimientos de los alumnos antes de la intervención (caracterización inicial ***Ci***), inmediatamente después de la intervención (*postest* de caracterización final ***Cf***), y cierto tiempo después (*postest* de retención ***Rt***). Los datos extraídos de las baterías de caracterización sirven para determinar las situaciones

inicial y final (a corto y medio plazo) de los conocimientos, y para valorar la cantidad y calidad del aprendizaje logrado, utilizando contrastes entre los referentes. Así, la comparación entre los resultados de la caracterización final y los de la caracterización inicial permiten determinar qué cambios se produjeron en el conocimiento de los estudiantes durante la intervención en el aula. El contraste entre los resultados del *test* de retención y los de la caracterización final mide la estabilidad en el tiempo (significatividad) del aprendizaje promovido por la metodología aplicada.

Las hipótesis de trabajo se verifican o refutan a partir del seguimiento del aprendizaje a lo largo de la intervención, tal como se muestra en la *Figura 7* (pág. 282). La evaluación del aprendizaje se realizó a partir de los resultados de las actividades que constituyen las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, y de las pruebas que conforman las baterías de caracterización de la muestra. Los resultados se sometieron a dos tipos de análisis cualitativo: un análisis de los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los alumnos en la interpretación de los hechos, fenómenos y situaciones propuestas (*Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento*, pág. 456), y un análisis de las competencias que demostraron al resolver las situaciones problemáticas planteadas en las actividades de las unidades didácticas y en las pruebas de *pre-test* y *post-tests* (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, pág. 458)

Para el contraste de la primera hipótesis (HT_1), se analizó el conocimiento de los alumnos antes de la intervención, esto es, el conocimiento relacionado con el desarrollo de la ***Fase 1*** y la ***Fase 2*** de la investigación. La ***Fase 1*** es la fase previa o de acomodación a la metodología (***Fp***), que consistió en la implementación de la secuencia de actividades *Termoquímica* y sirvió para proporcionar un período de adaptación a la metodología propuesta, de manera que se minimizaran las influencias del cambio metodológico sobre el posterior desarrollo de *Termodinámica Química*. Mediante el seguimiento sistemático de las manifestaciones orales y escritas del alumnado durante la fase previa, se valora la construcción del conocimiento a lo largo del proceso de acomodación a la nueva metodología. Teniendo en cuenta el propósito de la unidad didáctica *Termoquímica* y su relación con la de *Termodinámica Química*, consideramos que el conocimiento construido a lo largo de la fase previa refleja buena parte del conocimiento inicial de los alumnos, por dos motivos: porque este conocimiento es básico para la construcción del posterior, y porque su aprendizaje se halla influido por el proceso de cambio metodológico. En consecuencia, los datos extraídos de la fase previa se dedican al contraste de la subhipótesis de trabajo 1.1 [*Subhipótesis de trabajo 1.1* ($sHT1_{.1}$), pág. 255].

En la ***Fase 2*** se realizó la caracterización inicial de la muestra ***Ci*** a partir del análisis de una serie de *items* que estructuraron en una batería inicial de pruebas (***Capítulo IV***). Esta fase experimental se relaciona con la subhipótesis de trabajo 1.2: determinar el conocimiento inicial de los estudiantes en el momento en se consideran minimizadas las influencias del cambio metodológico sobre el proceso de aprendizaje [*Subhipótesis de trabajo 1.2 ($sHT1_{.2}$)*, pág. 255].

Inmediatamente después de la ***Fase 2***, se aplicó la propuesta didáctica sobre Termodinámica Química, en lo que denominamos la fase de intervención ***Fi***, que es la ***Fase 3*** del diseño experimental. Los resultados obtenidos con el seguimiento sistemático de las manifestaciones orales y escritas del alumnado durante el proceso de construcción del conocimiento asociado a ***Fi***, han servido para contrastar la segunda hipótesis de trabajo, HT_2. La influencia de la metodología ensayada sobre el aprendizaje [Segunda hipótesis de trabajo (*HT*2)256] se determinó mediante el análisis de la evolución que experimentó el conocimiento de los alumnos a lo largo de la intervención.

La ***Fase 4*** del diseño experimental se relaciona con la verificación o rechazo de la tercera hipótesis de trabajo, HT_3, cuyo contraste requiere valorar el aprendizaje final promovido por la metodología ensayada:

Si nos limitamos a evaluar el conocimiento inmediatamente después de la fase de intervención, renunciamos a verificar hasta qué punto el aprendizaje generado es significativo, porque el predominio de la memoria a corto plazo puede influir significativamente en los resultados de la caracterización final. Para estudiar la significatividad del aprendizaje, se ha de comprobar la estabilidad de éste en el tiempo. Son resultado de un aprendizaje significativo aquellas estructuras de conocimiento en las que no se verifiquen pérdidas significativas un cierto tiempo después de la intervención. El aprendizaje generado no es significativo si se detectan grandes pérdidas con el tiempo, en cuyo caso solamente se habría producido en el alumnado una cierta sensibilización sobre la temática objeto de estudio, pero no la construcción de un conocimiento que se active de forma efectiva a medio o largo plazo.

Teniendo en cuenta estas reflexiones, para el contraste de la tercera hipótesis de trabajo se diseñaron dos baterías de caracterización que se aplicaron una vez terminado el desarrollo de la unidad didáctica *Termodinámica Química*:

En primer lugar se procedió al contraste de la primera subhipótesis de HT_3, $sHT_{3.1}$. Para ello, se realizó una caracterización final de la muestra (***Cf***) que consistió en una batería final de pruebas destinadas a evaluar el conocimiento inmediatamente después de la aplicación de la propuesta sobre Termodinámica Química [*Subhipótesis de trabajo 3.1 (*$sHT3_{.1}$*)*, pág. 257]. Los resultados de la caracterización final son en cierto sentido complementarios a los de la fase de intervención, pero sus datos se tomaron una vez concluida la intervención, y se han evaluado independientemente de ella. El contraste entre los resultados del *postest* de caracterización final y los del *pretest* de caracterización inicial, pone de manifiesto el aprendizaje que se generó como consecuencia de la intervención.

El contraste de la subhipótesis $sHT_{3.2}$ se realizó mediante un segundo *postest* o *test* de retención ***Rt***, que se aplicó dos meses después de la intervención con el objetivo de averiguar qué aprendizajes permanecieron estables en tiempo [*Subhipótesis de trabajo 3.2 (*$sHT3_{.2}$*)*, pág. 258]. Nos parece interesante que los diseños experimentales de este tipo de

investigaciones contemplen la posibilidad de realizar una evaluación a medio o largo plazo como la del *test* de retención al que nos referimos, porque estas evaluaciones son una herramienta útil para valorar si los alumnos desarrollaron un aprendizaje significativo de la ciencia escolar. En este sentido, pueden considerarse una prueba de fuego sobre la rentabilidad académica de cualquier intervención en el aula.

Para que los resultados del *test* de retención no se vieran afectados por factores ajenos a la investigación, nos aseguramos de que el alumnado no recibiera información institucional sobre los contenidos de enseñanza después de la implementación de la segunda propuesta. El contraste entre los resultados del *postest* de retención y los del *pretest* de caracterización final, pone de manifiesto el aprendizaje significativo que se generó como consecuencia de la intervención, porque mide los conocimientos que se adquirieron durante la implementación de las propuestas y se retuvieron de manera estable a medio plazo.

En la presente investigación ha sido imposible realizar un *postest* a largo plazo, porque este estudio de caso se desarrolló en el contexto de una muestra de alumnos de 2º de Bachillerato, que terminaban aquel mes de junio sus estudios en el Instituto. Además, los profesores del centro querían finalizar en el mes de mayo el desarrollo del temario de las asignaturas, para disponer de tiempo suficiente de cara a la preparación de las PAAU. Dada la importancia de las pruebas de Selectividad en el futuro profesional de los estudiantes, los investigadores optamos por no añadir presión interferiendo en la dinámica de la preparación de las PAAU. La única solución para contar con una caracterización de la muestra a medio plazo fue aplicar la batería de retención, coincidiendo con el final del curso reglado y el comienzo de las sesiones de preparación de las PAAU.

La *Tabla 7* recoge simbólicamente las claves del diseño experimental (Campbell y Stanley, 1982), cuyo significado se enuncia a continuación:

Las *X* constituyen intervenciones en el aula, y las *O* son las observaciones realizadas. La variable independiente del diseño experimental viene configurada por X_{TQ}, y se describe en los siguientes apartados de este ***Capítulo II***. Las distintas *O* representan variables independientes, a las que se dedican los ***Capítulos III, IV, V, VI y VII***.

Tabla 7: claves en el diseño experimental de la investigación

<table>
<tr><td rowspan="2">X_p</td><td rowspan="2">X_T</td><td>O_T =
$= f[O_T(me),O_T(mo)]$</td><td>O_i =
$= f[O_i(e),O_i(c)]$</td><td rowspan="2">X_{TQ}</td><td>O_{TQ} =
$= f[O_{TQ}(me),O_{TQ}(mo)]$</td><td>$O_f$ =
$= f[O_f(e),O_f(c)]$</td><td>O_r =
$= f[O_r(e),O_r(c)]$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$sHT_{1.1}$</td><td>$sHT_{1.2}$</td><td rowspan="2">HT_2</td><td>$sHT_{3.1}$</td><td>$sHT_{3.2}$</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="2">HT_1</td><td colspan="2">HT_3</td></tr>
</table>

X_p: intervención previa, realizada con otros métodos de investigación

X_T: intervención con la propuesta didáctica sobre Termoquímica (***Capítulo III***), durante la que se van minimizando los efectos del cambio metodológico

O_T: observación de la aplicación de la propuesta didáctica sobre Termoquímica (***Capítulo III***). Esta observación es función de la información recogida en los materiales escritos y en el registro de las manifestaciones orales de los estudiantes, siendo:

$O_T(me)$: observación basada en las manifestaciones escritas de los estudiantes, contenidas en los materiales de trabajo

$O_T(mo)$: observación basada en las manifestaciones orales de los estudiantes, registradas en material videográfico y de audio

O_i: observación inicial, función de una serie de observaciones que se tratan en el ***Capítulo IV***:

$O_i(e)$: observación inicial respecto a los esquemas de conocimiento

$O_i(c)$: observación inicial respecto a las competencias

X_{TQ}: intervención con la propuesta didáctica sobre Termodinámica Química (variable independiente de la investigación)

O_{TQ}: observación obtenida paralelamente al desarrollo de la aplicación de la propuesta didáctica sobre Termodinámica Química (***Capítulo V***). Esta observación es función de la información recogida en los materiales escritos y en el registro de las manifestaciones orales de los estudiantes, siendo:

$O_{TQ}(me)$: observación basada en las manifestaciones escritas de los estudiantes, contenidas en los materiales de trabajo

$O_{TQ}(mo)$: observación basada en las manifestaciones orales de los estudiantes, registradas en material videográfico y de audio durante la intervención

O_f: observación final, función de una serie de observaciones que se tratan en el ***Capítulo VI***:

$O_f(e)$: observación final respecto a los esquemas de conocimiento

$O_f(c)$: observación final respecto a las competencias

O_r: observación de las pruebas de retención, función de una serie de observaciones (***Capítulo VII***):

$O_r(e)$: observación de retención respecto a los esquemas de conocimiento

$O_r(c)$: observación de retención respecto a las competencias

II.3. Variables implicadas en la investigación

La variable independiente de este trabajo es la metodología que se ensayó en el aula, y viene representada por la implementación de la segunda de las dos propuestas didácticas evaluadas, que trata sobre Termodinámica Química (X_{TQ}). Ambas propuestas están inspiradas en la metodología *AcAb* y en las perspectivas del constructivismo social

derivadas de la investigación en Didáctica de las Ciencias (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27). Desde el punto de vista del diseño experimental, la variable independiente viene configurada por las observaciones que se han realizado a lo largo de la aplicación de *Termodinámica Química* (***Capítulo V***), que son función de la información recogida en los materiales escritos y en el registro de las manifestaciones orales de los estudiantes, registradas en material videográfico y de audio durante la intervención.

Antes de enunciar las demás variables de la investigación, se repasan las limitaciones del diseño experimental y las suposiciones que lleva implícitas:

Se considera que la intervención en el aula tuvo lugar en condiciones estándar, sin que ningún factor ajeno al trabajo investigador (las familias de los estudiantes, los medios de comunicación, las instituciones, etc.) influyera sustancialmente ni en la evolución de los conocimientos de los alumnos, ni en la actitud y expectativas del profesor hacia la metodología ensayada. Se supone también que el alumnado respondió a las actividades y pruebas de manera sincera, y que sus respuestas, las de sus padres y los profesores a las entrevistas realizadas son también veraces.

La principal restricción del diseño experimental es la imposibilidad de extrapolar los resultados de la investigación. Nos hemos limitado a estudiar la evolución que experimentaron los conocimientos de un grupo de 11 alumnos de 2º de Bachillerato como consecuencia de la interacción con la metodología implementada a través de las propuestas sobre Termoquímica y Termodinámica Química, y hemos indagado únicamente en el aprendizaje alcanzado en el área de la Termodinámica de los procesos químicos, sin entrar a valorar la evolución de otros conocimientos.

A continuación se enuncian las variables dependientes e intervinientes en la presente investigación:

II.3.1. Variables dependientes e intervinientes

La variable dependiente, que se pretende evaluar, es el aprendizaje alcanzado por los alumnos de la muestra como resultado de su interacción con la metodología ensayada. Los instrumentos para su evaluación, que permiten asignar valores a la variable dependiente, son los esquemas de razonamiento y acción (*Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento*, pág. 456) y las competencias (*Evaluación del aprendizaje por competencias*, pág. 458). Sobre el aprendizaje pueden influir multitud de variables (intervinientes), y se ha intentado controlar el máximo número de ellas:

Los alumnos de la muestra pertenecían al mismo grupo de clase y compartían profesor, así que la metodología, la duración de la intervención docente y los contenidos de enseñanza y aprendizaje fueron idénticos para todos. Realizaron las mismas actividades teóricas y de laboratorio y repartieron las tareas de manera equitativa, se les asignaron las mismas tareas extraescolares (*Variables dependientes e intervinientes*, pág. 287) y realizaron las mismas pruebas de caracterización con idéntica temporalización.

En cuanto a las variables idiosincrásicas de los individuos de la muestra, todos tenían entre 17 y 18 años de edad y cursaban la modalidad de Ciencias de la Naturaleza y la Salud, aunque no todos habían elegido las mismas optativas (*Tabla 3*, pág. 269). En todo caso, ninguna de las materias optativas incluía contenidos sobre la Termodinámica de los procesos químicos, y los investigadores se aseguraron de que los integrantes de la muestra no recibieran información institucional adicional sobre Termoquímica y Termodinámica Química en las demás asignaturas que estudiaban. Las principales variables idiosincrásicas que podrían tener alguna incidencia en el aprendizaje son las cuatro que se enuncian a continuación:

- ***El sexo de los alumnos***: La muestra está compuesta por cinco varones y seis mujeres; para comprobar si la variable sexo influye de manera significativa en la evolución del conocimiento, se ha realizado un contraste entre los resultados de aprendizaje correspondientes a los chicos y las chicas.
- ***La condición de Adela como alumna repetidora de la materia de Química de 2º de Bachillerato***: por esta circunstancia, cabía la posibilidad de que esta alumna tuviera conocimientos sobre Termoquímica y Termodinámica Química que difirieran significativamente de los de sus compañeros. Este tipo de circunstancias no son infrecuentes en los entornos de aula, pero bastantes investigaciones educativas descartan las muestras que manifiestan estas características; en otros estudios, se suprimen los datos de aquellos estudiantes que, por su instrucción previa, pueden distorsionar los resultados al influir en el desarrollo del aprendizaje de los demás. En nuestro estudio de caso, dado el pequeño tamaño de la muestra y la posibilidad de realizar un seguimiento exhaustivo para rastrear la influencia de las ideas de esta alumna en la evolución de las ideas de sus compañeros, decidimos no eliminar los datos de Adela del estudio muestral hasta comprobar si la instrucción previa de esta alumna había producido un nivel de conocimientos significativamente superior al de los otros estudiantes y una influencia de estos conocimientos en el desarrollo del aprendizaje de los demás. Era de esperar que, en todo caso, la proyección de sus ideas en los compañeros no distorsionaría de manera determinante el desarrollo del aprendizaje y las relaciones de cooperación dentro de su grupo de trabajo, por dos razones: en primer lugar, la actitud de Adela era la de una persona colaborativa y tímida, no propensa a imponer sus opiniones a los demás; en segundo lugar, esta chica sufría una enfermedad metabólica que dificultaba su aprendizaje, por lo que probablemente la diferencia entre sus conocimientos y los de sus compañeros no fuera tan drástica como para que éstos aceptaran dogmáticamente las afirmaciones de Adela siguiendo el principio de autoridad que se observa, por ejemplo, ante la figura del profesor (Russell, 1983). Tras analizar los resultados de la investigación, se constata que la instrucción previa de Adela no modificó en la práctica el aprendizaje de sus compañeros (***Capítulo VIII***).

- ***El nivel de asistencia a las sesiones de clase***: ningún alumno causó baja en el Centro durante el transcurso de la investigación, pero se observó una clara tendencia hacia el abandono escolar en varios integrantes de la muestra (*Sujetos, características y contexto de la muestra*, pág. 265). La inasistencia a las sesiones de clase repercute en la variable dependiente de la investigación por dos razones:

En primer lugar, porque hace disminuir drásticamente el número de oportunidades de aprendizaje. La comunicación entre iguales y con el experto establecida en el entorno de trabajo facilita la construcción del conocimiento entre todos los participantes (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27), porque el aprendizaje es una actividad social y colaborativa que depende de la estructura cognitiva y del entorno social del que aprende. Si un alumno falta a un número significativo de sesiones de clase, no está presente en múltiples situaciones en las que sus compañeros, con ayuda del profesor, realizan tareas con niveles de ZDP que ayudarían al estudiante ausente a progresar en sus conocimientos conceptuales, procedimentales y actitudinales.

En segundo lugar, la inasistencia puede ser una manifestación del rechazo al aprendizaje (o al entorno concreto en el que éste tiene lugar), en lo que constituye un claro obstáculo actitudinal a la construcción de conocimientos. Desde el punto de vista de la investigación didáctica en general, es importante esclarecer las causas del absentismo escolar y combatirlas. En esta investigación en particular, que pretende evaluar la efectividad de dos propuestas didácticas para generar aprendizaje, resulta vital determinar si la inasistencia de estos alumnos tiene o no relación con su rechazo a la metodología ensayada, e indagar en los efectos del absentismo en el progreso de la construcción de conocimientos de los individuos involucrados.

En tercer lugar, la inasistencia prolongada puede convertirse en un caso de muerte muestral, y esta circunstancia obliga a verificar si la muestra ha sufrido cambios significativos entre las distintas caracterizaciones. Así pues, se han analizado los efectos de la inasistencia sobre el aprendizaje (***Capítulo VIII***).

II.3.2. Variable independiente: la metodología de enseñanza

A lo largo de los tres apartados en los que se divide este apartado, se describen y se analizan las características que definen la variable independiente de esta investigación, que es la metodología ensayada en el aula.

En el primer apartado se detallan los fundamentos metodológicos que derivan del marco teórico expuesto en *Revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pág. 14), y que inspiran las dos propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química. Los principales aspectos de la metodología que tienen una incidencia significativa en el desarrollo del proceso de aprendizaje son los tipos de conocimiento cuya construcción se fomenta (*Los conocimientos deseables desde la ciencia escolar*, pág. 291), la organización del aula [*El escenario de enseñanza y aprendizaje*

(organización del aula), pág. 293], y aquellas recomendaciones legislativas de los diseñadores del *curriculum* que consideramos interesantes a la hora de diseñar y planificar ambas propuestas (*Los referentes legislativos*, pág. 310).

En el segundo apartado de este apartado, se presentan las propuestas sobre Termoquímica y Termodinámica Química, siguiendo las cinco etapas del modelo que se eligió como referente para su diseño y planificación (Sánchez y Valcárcel, 1993; Domínguez Castiñeiras, 2007). Estas etapas son: la selección, organización y secuenciación de los contenidos objeto de aprendizaje (*TAREA 1.- Selección, organización y secuenciación de los contenidos*, pág. 313); el análisis de la problemática de aprendizaje y de enseñanza de los contenidos [*TAREA 2.- Problemática de aprendizaje y de enseñanza de los contenidos (análisis didáctico del contenido deseable)*, pág. 414]; la selección y formulación de los objetivos de aprendizaje (*TAREA 3.- Selección y formulación de los objetivos de aprendizaje*, pág. 442); la selección de las estrategias de instrucción (*TAREA 4.- Selección de las estrategias de instrucción*, pág. 448); y la selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje generado (*TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje*, pág. 449).

En el tercer y último de los apartados dedicados a la descripción y análisis de la metodología ensayada, se describen y se analizan pormenorizadamente las actividades que conforman las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química*. La presentación de cada actividad incluye las tareas que se plantean al alumnado, una breve revisión de las dificultades que pueden surgir en el aula durante la implementación, y una serie de recomendaciones para ayudar al profesor a llevar las actividades a su aula, teniendo en cuenta la idiosincrasia de sus alumnos y la dinámica de trabajo que podrá crear.

II.3.2.1. Fundamentos de la metodología

Desde la investigación educativa se proponen diversos principios metodológicos; en el apartado *Revisión de la literatura científica en el marco de la Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pág. 14) se han revisado aquéllos en los que se fundamenta la metodología didáctica ensayada. Sobre estos principios se construyó el planteamiento metodológico que inspira las propuestas *Termoquímica* y *Termodinámica Química*:

En primer lugar, se selecciona qué se pretende enseñar (*Los conocimientos deseables desde la ciencia escolar*, pág. 291). Éstos se construyen en un aula, escenario que tiene por protagonistas a los que aprenden y por guía al docente, y que está situado en un contexto social, histórico e institucional concreto (Vygotsky, 1964, 1979) cuyos principales factores intervienen en la construcción de conocimiento. Para preparar el escenario de enseñanza y aprendizaje de manera que se haga favorable a la construcción de conocimientos, ha de planificarse *El escenario de enseñanza y aprendizaje (organización del aula)* (pág. 293). Entre los elementos del contexto social, histórico e institucional en el que se produce el aprendizaje, está el sistema educativo vigente, con las correspondientes recomendaciones de los legisladores en materia de educación (*Los referentes legislativos*, pág. 310).

Los conocimientos deseables desde la ciencia escolar

Realizar un análisis didáctico implica seleccionar los conocimientos que serán objeto de aprendizaje y que en la *praxis* educativa se reflejan en unos contenidos curriculares en correspondencia con las finalidades de la enseñanza de las Ciencias.

La investigación educativa realiza interesantes aportaciones sobre la relación entre las metas de la enseñanza de las Ciencias y los contenidos curriculares. Si se pretende que los contenidos científicos tengan relevancia para el alumnado, la enseñanza no debe girar en torno a la finalidad propedéutica (Elliot, 1990), aunque no se debe perder de vista que entre las metas de la educación en Ciencias está la preparación de los estudiantes para acceder a niveles de formación avanzados. Los niños y adolescentes otorgan al aprendizaje de las Ciencias una relevancia que viene dada, en buena medida, por la proyección de los contenidos científicos sobre el mundo en el que ellos viven (Claxton, 1994; Lemke, 1997). Por este motivo, se recomienda orientar los contenidos de forma que lo que ocurre en el aula constituya una experiencia educativa en sí misma (Head, 1985; Claxton, 1994; Arnay, 1997), sin excluir la finalidad propedéutica.

Seleccionar el conocimiento deseable desde la ciencia escolar, mediante el proceso que Bromme (1988) denomina metaconocimiento de la asignatura (conocimiento sobre los conocimientos a enseñar) supone diferenciar entre lo que resulta interesante y relevante para la comunidad científica, y lo que resulta interesante y relevante para el alumnado (Arnay, 1997). Esta diferenciación hace posible que un objeto de saber científico llegue a ser objeto de saber para la enseñanza (Chevallard, 1985; Jiménez y Sanmartí, 1997).

A través de esta reflexión o metaconocimiento se concreta parte del diseño y la planificación de las propuestas de enseñanza, seleccionando aquellos conceptos, modelos y procedimientos de la Ciencia que, por su interés para el alumnado y su trascendencia para la construcción de conocimientos, se consideran deseables desde la ciencia escolar.

Desde nuestra visión de la Ciencia y de su enseñanza y aprendizaje, la construcción del conocimiento científico no se limita a la adquisición de significados: también incluye el desarrollo de las capacidades de razonar y argumentar sobre problemas científicos (García de Cajén, Domínguez Castiñeiras, y García-Rodeja Fernández, 2002). En consecuencia, mediante las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química, se desea fomentar el aprendizaje de tres tipos de conocimiento (Duschl, 1995; Duschl y Gitomer, 1996; Driver, Newton y Osborne, 2000): las destrezas cognitivas, el conocimiento epistemológico-científico y las destrezas sociales y de comunicación.

Las destrezas cognitivas

En el constructivismo social, el razonamiento y la argumentación son destrezas cognitivas importantes en la construcción de significados, porque el aprendizaje del conocimiento científico implica diversos procesos discursivos relacionados con el

lenguaje, los símbolos y los modelos teóricos, los cuales constituyen herramientas muy potentes de interpretación (Casella y Giuliani, 1999). Desde este marco teórico, la enseñanza de las Ciencias debe fomentar en los estudiantes el desarrollo de una forma de pensar científica (Hodson, 1994; Duschl, 1997) que utilice el lenguaje, los símbolos y los modelos teóricos en relación con los conceptos y las teorías de la Ciencia.

A diferencia del rol que han adjudicado a los experimentos e investigaciones en el aula otras perspectivas teóricas (como el positivismo), para el constructivismo, la experimentación y la investigación no ejercen de meros auxiliares de las teorías científicas. Según los postulados positivistas, el trabajo experimental es un instrumento para construir los pasos procedimentales de la práctica científica; los constructivistas consideran el trabajo experimental como una herramienta en la construcción de significados, a través de las estrategias de interpretación y de resolución de problemas.

Si se pretende que los estudiantes piensen con los conceptos y las teorías de la Ciencia, ha de darse un papel prioritario a la experimentación y la investigación, mediante las cuales se pondrán en juego las estrategias de interpretación y de resolución de problemas. Es evidente que la investigación y el trabajo experimental en el aula de Ciencias deben planificarse: hay que decidir cuál el propósito del experimento, elaborar el diseño apropiado y seleccionar los métodos que proporcionarán datos fiables, con los que se podrán evaluar las diferentes interpretaciones alternativas (Pozo, 1999a). En el proceso de inferencia del conocimiento en relación con cualquier problema, y desde la obtención de los datos hasta la reflexión y toma de decisiones sobre las diferentes interpretaciones alternativas, las teorías científicas juegan un papel fundamental (Duschl y Erduran, 1996).

El conocimiento epistemológico-científico

Además de pensar con las teorías y utilizar modelos teóricos para elaborar interpretaciones, con la enseñanza de las Ciencias se pretende que los estudiantes sean capaces de pensar también acerca de las teorías, reflexionando sobre los modelos e interpretaciones científicas (Kuhn, 1993).

Utilizando el razonamiento y la argumentación para elaborar interpretaciones sobre los hechos, situaciones y fenómenos que se les presentan, los alumnos pueden conocer las normas por las que los científicos adoptan decisiones racionales sobre hipótesis alternativas, y de este modo explorar la epistemología de la Ciencia. Se pretende que perciban que las teorías científicas son construcciones humanas, no conclusiones automáticas que se pueden obtener por deducción a partir de los datos. Para dar respuesta a un problema cualquiera, se postulan posibles interpretaciones del hecho o fenómeno y, a la luz de las pruebas de las que se dispone, se evalúa la capacidad explicativa y predictiva de los argumentos que respaldan cada interpretación.

Con el objetivo de que los estudiantes lleguen a desarrollar de manera consciente este proceso de reflexión, sobre los distintos hechos y fenómenos tratados en el aula se han de hacer explícitas las diferentes interpretaciones posibles y los argumentos que las

respaldan. Para llegar a decidir cuál de las interpretaciones ofrece la mejor explicación, los alumnos tienen que poner en juego no sólo los modelos y las teorías sobre el mundo, sino también la capacidad de razonar sobre cuestiones científicas utilizando los modelos y las teorías (Domínguez Castiñeiras, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1999; García de Cajén, Domínguez Castiñeiras, y García-Rodeja Fernández, 2002; Domínguez Castiñeiras, Pro, García-Rodeja e Illobre, 1998). En este proceso metacognitivo, el docente ejerce de guía de una discusión reflexiva que conduzca a la comparación y el contraste de las interpretaciones alternativas que se formulan sobre el problema propuesto.

Autores como Pontecorvo y Girandet (1993) proponen una evolución de la idea de conocimiento específico de una materia desde el conocimiento proposicional (el qué de las Ciencias) hasta la capacidad de justificar las creencias propias dentro de una tradición particular; esto es, la forma de trabajar de las Ciencias (Jiménez Aleixandre, 1998).

Las destrezas sociales y de comunicación

El desarrollo de una concepción de la Ciencia como actividad social requiere la comprensión de los mecanismos con los que la comunidad científica ha elaborado desde hace siglos y continúa elaborando respuestas a determinados problemas de las distintas épocas. Este enfoque subraya la importancia del razonamiento y la argumentación en el progreso de la Ciencia y de la actividad científica a lo largo de la historia. Autores como Giere (1999) sostienen que las vertientes social e histórica del conocimiento y de la actividad científica no deben ocultarse a los estudiantes, y que los docentes no deben ignorar estos aspectos, si se pretende construir una imagen actualizada de la Ciencia como medio de producción y divulgación de conocimiento. La componente sociológica es imprescindible para comprender la Ciencia y el conocimiento científico (Driver, Newton y Osborne, 2000), así que desde la enseñanza se debe potenciar su dimensión social y combatir el mito de que la Ciencia es una actividad neutral (Catalán y Catalany, 1986) que avanza al margen de las sociedades, como si no fuera una elaboración humana para resolver problemas humanos y cubrir necesidades y expectativas humanas.

En cuanto al conocimiento deseable relacionado con las destrezas de comunicación, teniendo en cuenta las características y el contexto de los alumnos a los que van dirigidas las propuestas didácticas objeto de investigación (2º de Bachillerato, 17-18 años), propondremos a los estudiantes comenzar a describir el mundo natural mediante el lenguaje de la vida diaria (Arnay, 1997; Claxton, 1994; Lemke, 1997). Partiendo de esta base, se les ayudará a construir el lenguaje científico para poder expresar con mayor capacidad comunicativa aquellos aspectos del mundo natural que son objeto de aprendizaje en las propuestas ensayadas (Duschl, 1997; Hodson, 1998; Giere, 1999).

El escenario de enseñanza y aprendizaje (organización del aula)

Hasta aquí se han desarrollado las premisas metodológicas sobre los conocimientos que se espera construir en el aula de Ciencias, que es el escenario del

aprendizaje. En este apartado, se describen y analizan las características del aula en la que se implementaron las dos propuestas objeto de esta investigación.

En el ***Capítulo I*** se puso de manifiesto la importancia que otorga el constructivismo social al contexto social, histórico e institucional (Vygotsky, 1964, 1979) en el que se produce la construcción de los conocimientos. Cuando el alumno, protagonista del aprendizaje, entra en el aula de Ciencias, se incorpora a un grupo de personas implicadas en el escenario de enseñanza y aprendizaje: aquí se encuentran los intereses, las preferencias, las actitudes y motivaciones, las dinámicas de trabajo y los esfuerzos del propio alumno, de sus compañeros y del profesor. Dado que éste es el guía del proceso de aprendizaje, debe establecer una organización del aula que sea favorable a la construcción de los conocimientos científicos. Cuando se habla de organización del aula, hay que planificar tanto el papel que juegan los protagonistas del aprendizaje y el docente, como la gestión de los elementos del escenario, sobre todo en lo que se refiere a los espacios, tiempos, recursos materiales y dinámicas de trabajo.

La creación de un clima de trabajo agradable y dinámico favorece la implicación de los alumnos en la construcción de conocimientos, pero se necesita también el establecimiento de un nuevo perfil de relaciones entre docente y discentes, porque no se genera automáticamente una actitud positiva hacia el aprendizaje simplemente por presentar a los estudiantes una nueva orientación de los contenidos o de su exposición. La nueva metodología y la dinámica de trabajo tienen que generar expectativas favorables que duren en el tiempo (Vilches, 2007).

La cantidad de variables que intervienen en la organización del aula es muy grande, debido a la influencia de numerosos y diversos agentes y elementos, cada uno con sus características idiosincrásicas. Por ejemplo, en la investigación que se presenta, se analiza la construcción de conocimientos de un grupo de once estudiantes de 17-18 años de edad, de diversa procedencia y nivel socio-económico heterogéneo, y a quienes se ha planteado un contexto de aprendizaje determinado con la ayuda de un profesor concreto. Debido a esta complejidad, la organización del aula se describe y analiza a lo largo de cuatro apartados, en cada uno de los cuales se detallan las características de un aspecto concreto: el papel del alumnado (*El papel del alumnado*, pág. 294), el papel del profesor (*El papel del profesorado*, pág. 299), el clima de aula y la dinámica de trabajo establecida durante la intervención (*Resumen: el clima de aula*, pág. 305), y los materiales de trabajo (*Los instrumentos de trabajo*, pág. 306).

El papel del alumnado

El objetivo principal de las propuestas ensayadas es generar un aprendizaje significativo (Ausubel *et al.*, 1983) que los estudiantes puedan utilizar en su vida, más allá del contexto académico. Evidentemente, lograr este tipo de aprendizaje requiere comprensión, y no la simple memorización de unos contenidos con la finalidad de aprobar un examen. Nuestra concepción del aprendizaje no se centra en la asimilación

limitada a la capacidad de recordar y reproducir una determinada información, porque este proceso consiste en manipular un conjunto de datos, conceptos, enunciados…, lo cual se puede hacer de forma poco o nada comprensiva y reflexiva. Utilizar conocimiento, por el contrario, requiere un alto nivel de comprensión en el procesamiento de la información, para elaborar razonamientos interpretativos sobre el problema que se pretende resolver.

Los resultados de una investigación realizada por Elliot (1990) ilustran la diferencia entre la asimilación poco reflexiva y el aprendizaje significativo: este autor realizó entrevistas personales a un gran número de alumnos, y muchos de ellos consideraban que el éxito en los exámenes dependía de lo que acabamos de denominar reproducción de información: tenían que aprender/retener unos contenidos para verterlos en el examen, los comprendieran o no, y la prioridad que daban a las distintas informaciones venía dada en función de la importancia que el profesor les hubiera concedido en el aula. Durante las sesiones de clase, los esfuerzos de los estudiantes se habían centrado en recopilar información y anotarla en sus cuadernos de trabajo para revisarla más tarde; en muchos casos, inmediatamente antes de los exámenes. Este fenómeno, que Elliot denomina posposición del aprendizaje, está directamente relacionado con el desarrollo de un aprendizaje pobre (poco significativo).

Frente a la idea de un alumno inerte y pasivo, al que hay que provocar mediante acciones externas o internas, en Didáctica de las Ciencias parece haberse alcanzado un acuerdo sobre la participación del que aprende en la adquisición de conocimientos: el conocimiento no se transmite o comunica sin más, sino que necesita del papel protagonista del alumno. Esta intervención del estudiante en el proceso de elaboración de conceptos y procedimientos es la base del principio de actividad (Cleminson, 1990).

Las propuestas de enseñanza ensayadas se elaboraron sobre estos fundamentos: el alumno es una persona espontáneamente activa que, al menos hasta que se sienta en el pupitre, tiene motivaciones para aprender (Domínguez Castiñeiras, 2000). Con el propósito de que se implique activamente en la construcción de conocimiento, consideramos adecuado que se haga responsable de su propio aprendizaje, que adopte decisiones activas en la resolución de los problemas y que desarrolle activamente las tareas que se le plantean. En consonancia con estos principios, el docente no debe dar a los estudiantes una supuesta respuesta correcta ni encauzarlos acríticamente hacia una solución concreta, sino ayudarles a ejercer la responsabilidad sobre las decisiones que los convierten en protagonistas del aprendizaje.

Del marco teórico de la investigación se extraen las características de la organización de aula que se estableció durante la puesta en práctica de las propuestas *Termoquímica* y *Termodinámica Química*:

La dinámica de trabajo se seleccionó de tal manera que propiciara la construcción de los tres tipos de conocimiento que se pretendían promover (*Los conocimientos deseables desde la ciencia escolar*, pág. 291): las destrezas cognitivas el conocimiento epistemológico-

científico y las destrezas sociales y de comunicación. Como el aprendizaje no se produce por simple transmisión, se planteó una dinámica que favoreciera tanto la actividad intelectual y el trabajo responsable y comprometido de cada alumno, como el desarrollo de las destrezas de tipo social y comunicativo: defender las opiniones con argumentos, repartir y compartir las tareas, respetar a los compañeros, escuchar y valorar las contribuciones ajenas…; lo que también fomenta actitudes y valores entre los cuales destacan el respeto, la colaboración, la perseverancia y la constancia.

Para ayudar a los estudiantes a desarrollar estas destrezas, se optó por promocionar el trabajo en pequeño grupo, perfectamente compatible con el desarrollo del trabajo individual en aquellas ocasiones que así lo requieren. De este modo se propician situaciones en las que los alumnos se implican más activamente en la construcción del conocimiento, explicitando, identificando y valorando la utilidad y las limitaciones de sus propias ideas, y siendo conscientes de las de sus compañeros, así como de las ideas propuestas desde la ciencia escolar.

A partir del trabajo en grupo, se establece un clima de debate en el que la argumentación cobra un papel destacado en las diferentes situaciones de aprendizaje: los alumnos explicitan sus ideas, emiten y comunican sus propias hipótesis y conclusiones, y elaboran sus propios argumentos para justificarlas (Domínguez Castiñeiras, 2007). En este entorno de trabajo resulta muy conveniente establecer dos niveles de debate: uno en pequeño grupo, que se desarrolla en primer lugar, y otro en grupo de clase, que se realiza posteriormente y a modo de puesta en común. El debate en pequeño grupo constituye un primer nivel en el que los alumnos participan con mayor tranquilidad y confianza, dado que trabajan entre ellos sin gran intervención del profesor. El segundo nivel sirve para recoger las opiniones de los distintos grupos, en un momento en el que ya se han discutido bastantes ideas y los estudiantes se sienten más seguros para compartir sus resultados y conclusiones con los demás grupos y con el profesor. Al poner en común afirmaciones o resultados obtenidos por los propios alumnos, éstos tienden a implicarse en el debate con más entusiasmo y espontaneidad. Este clima, unido a la diversidad de las ideas y resultados, puede aprovecharse para propiciar nuevas situaciones de aprendizaje.

Las dinámicas de debate en pequeño grupo ayudan a la participación activa de todos si la composición y el número de miembros de los grupos son adecuados para conciliar el desarrollo de las clases y los intereses y preferencias del alumnado:

En cuanto a la composición de los grupos, preferimos que fuera libre, porque así se suele crear un clima de trabajo distendido y colaborativo, favorable al desarrollo de las destrezas sociales y de comunicación y al refuerzo de actitudes positivas hacia el aprendizaje. No obstante, se mantuvo abierta la posibilidad de alterar la composición de los grupos si se daba el caso de que las interrelaciones no fueran las adecuadas, bien porque alguno de los alumnos indicara que se sentía incómodo, o porque el profesor considerara que algún grupo no funcionaba adecuadamente debido a su constitución.

La elección del número de miembros para los grupos de trabajo estuvo, en gran medida, condicionada por el tamaño de la muestra: con once estudiantes, la organización en conjuntos de cuatro o más personas supone que solamente existan dos o tres grupos, con lo cual las posibilidades de debate en grupo de clase se restringen bastante; por otra parte, la disposición en parejas nos parecía demasiado reducida como para que se propiciase un debate en pequeño grupo que maximizara las oportunidades de trabajar la flexibilización de las ZDPs por una mayor variedad en la interacción entre iguales (*El aprendizaje desde la perspectiva constructivista social*, pág. 27). La necesidad de encontrar un compromiso para el buen funcionamiento de los dos niveles de debate nos llevó a distribuir a los estudiantes en grupos de tres miembros cada uno, quedando un grupo restante formado por dos personas. El reducido número de alumnos, la naturaleza abierta de las actividades propuestas y la disponibilidad de abundante material de laboratorio evitó que se produjeran desajustes en el reparto de las tareas (teóricas o prácticas) y en la utilización del material necesario para las actividades experimentales. Para asegurarnos de que todos se esforzaban por igual, y para que la dinámica de trabajo fuese más fácilmente monitorizable, todos los grupos realizaron las mismas tareas.

El lugar seleccionado para desarrollar las sesiones de clase fue el laboratorio de Química del Centro, de amplias dimensiones, que cuenta con una mesa para el profesor y tres largas mesas de trabajo, en cada una de las cuales pueden sentarse, en taburetes de altura regulable, hasta seis personas. Este mobiliario y el gran espacio disponible facilitaron la realización de las actividades experimentales y la distribución de los alumnos en pequeños grupos, con amplio espacio para interaccionar con los compañeros y con el docente sin sensación de estrechez. Al mismo tiempo, se minimizaron los problemas que implicaba el registro videográfico de las sesiones, porque había puntos de conexión a la corriente eléctrica repartidos por toda el aula de laboratorio, y la ubicación de los trípodes y el cableado no suponían un obstáculo para la movilidad de los alumnos.

A la hora de situar los grupos de alumnos en el aula de laboratorio, se adoptó una disposición única para el desarrollo de las todas las actividades, ya fueran éstas de carácter experimental o teórico. Esta decisión se basa en dos razones:

En primer lugar, consideramos que no cambiar de distribución los grupos podía contribuir a integrar las prácticas experimentales en la dinámica "teórica", la única que resultaba familiar a los estudiantes. De hecho, antes de la aplicación de las propuestas, durante una de las reuniones entre la autora de esta Memoria y el docente colaborador (Rodrigo), éste confirmó que los alumnos estaban poco o nada familiarizados con metodologías de enseñanza diferentes de la tradicional. Esta impresión ayudó al profesor a decidir que las actividades teóricas y experimentales se realizarían en el mismo espacio, para favorecer la concepción del trabajo experimental como una *praxis* habitual del trabajo científico. Durante la intervención, varios alumnos manifestaron asombro y desconcierto al comprobar que las "clases normales" se desarrollaban en el laboratorio exactamente igual que "las prácticas", también después de haber terminado "las prácticas".

La segunda razón por la que se adoptó la disposición final que se observa en la *Figura 8* es de tipo práctico: la longitud de las mesas del laboratorio hacía difícil cambiar su ubicación y orientación, así que los alumnos tendrían que distribuirse en filas paralelas. Para que tuvieran cerca el material de laboratorio, se les sugirió que se sentaran en las dos mesas del fondo, desde las cuales también se ve bien el encerado; esta disposición facilitó un buen ángulo de grabación de las actividades de los dos grupos y, al mismo tiempo, les alivió la cohibición que sintieron ante las cámaras en la primera sesión de clase.

La estrategia de distribución para organizar los grupos de alumnos en el aula se recoge en la *Figura 8*, en la que los círculos de fondo oscuro simbolizan al profesor Rodrigo en sus localizaciones preferidas dependiendo del momento: ejerciendo de moderador del debate (localizaciones **1** y **2**, según la conveniencia de utilizar o no el encerado, respectivamente) o de supervisor del trabajo en pequeño grupo (en este caso, se movía entre las mesas siguiendo la ruta marcada por la flecha que rodea la localización **3**). Durante el trabajo individual o en pequeño grupo, el profesor se desplazaba en el espacio alrededor de las dos mesas para percibir mejor lo que hacía cada estudiante, escuchar sus ideas, realizar aportaciones, aclarar dudas… Cuando daba paso a los debates en grupo de clase, se situaba enfrente de las mesas, de manera que podía ver a todos los alumnos. Si consideraba que no necesitaba escribir en el encerado, se colocaba de pie ante la primera mesa, y si tenía que hacer anotaciones en la pizarra, se desplazaba hasta el frente del aula.

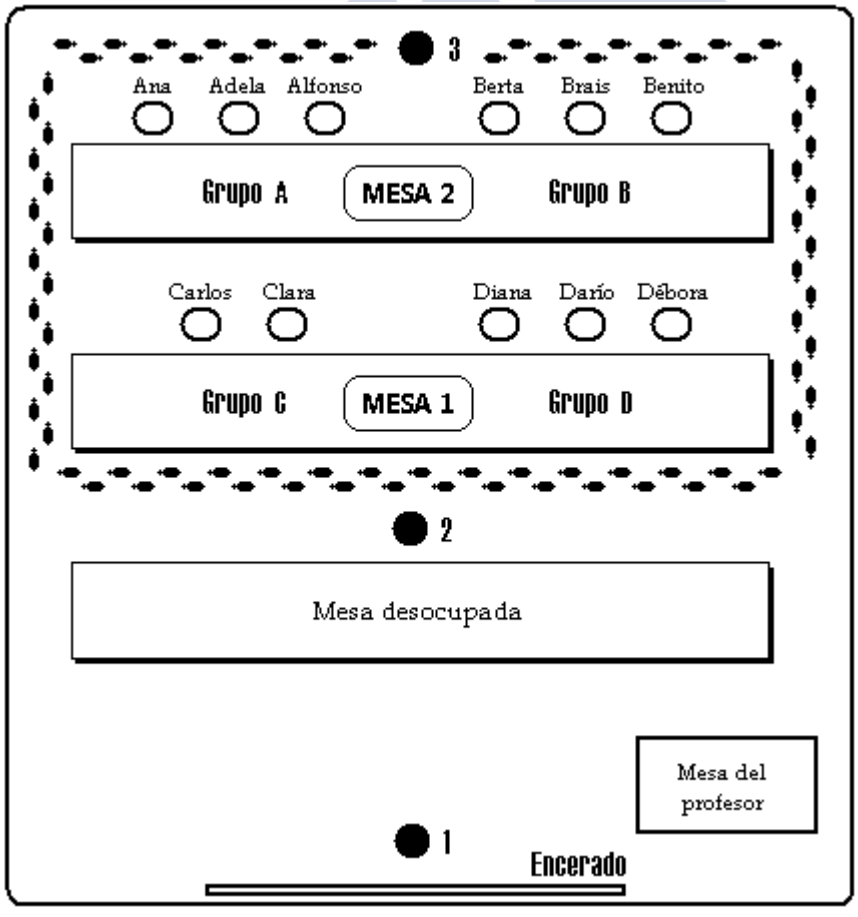


Figura 8: ubicación de los grupos de alumnos en el aula de laboratorio

Dadas las dimensiones y el mobiliario del aula de laboratorio, esta distribución permitía la máxima interacción posible entre los alumnos de los distintos grupos, y entre éstos y el profesor. Todos disponían de espacio suficiente para moverse por el aula durante las actividades que requerían la utilización de técnicas experimentales, y los integrantes de los grupos de la primera mesa (G_C y G_D) podían volverse de espaldas al encerado para deliberar con los de los otros dos grupos (G_A y G_B), sentados a la segunda mesa. Al comienzo mismo de la intervención, los alumnos de G_A y G_B no se atrevían a poner sus guiones de trabajo directamente sobre la segunda mesa, así que los colocaban encima de una carpeta que mantenían sobre sus rodillas, o los apoyaban entre su regazo y el borde de la segunda mesa, en un ángulo más o menos cómodo para escribir. Pero enseguida ganaron confianza y optaron por acercar sus taburetes a la segunda mesa y escribir directamente sobre ella, junto a los compañeros de los grupos G_C y G_D.

La investigadora se sentaba ante una mesa auxiliar alta, que está paralela a la pared y situada bajo una ventana, a la derecha de la distribución que se observa en la *Figura 8* (ver página anterior). En esa zona, el laboratorio dispone de un amplio pasillo entre las mesas de trabajo y las ventanas de la pared derecha, a lo largo de la cual se sitúan, muy espaciados entre sí, los fregaderos y las bandejas de secado. En el pasillo entre las mesas de trabajo y las ventanas, procurando no estorbar el paso, la investigadora situó las dos cámaras de vídeo. Ella misma se sentó frente a la primera cámara, delante de la ventana que aparecería a la misma altura que la posición **2** de Rodrigo en la *Figura 8* (ver página anterior). Desde allí tenía buena visibilidad de los cuatro grupos de alumnos y contaba con espacio suficiente para escribir las incidencias de aula y sus impresiones sobre la marcha de las clases.

El papel del profesorado

También la idiosincrasia del profesor condiciona el proceso de enseñanza y aprendizaje. Todo docente, en función de sus propias concepciones e intereses, asume explícita o implícitamente un modelo de enseñanza determinado, cuyas características determinan en buena medida el clima de aula, la utilización de los recursos disponibles y la cantidad y cantidad de oportunidades que se crean en los distintos momentos para generar un aprendizaje significativo de las Ciencias.

En la recensión bibliográfica (*El nuevo modelo de profesorado*, pág. 63) se han revisado las distintas concepciones del profesorado que se defienden desde los principales paradigmas de la Didáctica, así como las características que la investigación educativa considera deseables en un docente, en cuanto a su formación y a sus concepciones científicas y didácticas. En el presente apartado, se exponen las implicaciones que se derivan de la metodología que proponemos, compartiendo la idea de Saura (1996) de que enseñar es un proceso complejo que incluye un conjunto de destrezas mediante las que se integran en la práctica una serie de compromisos teóricos sobre los que fundamentamos el papel que juega el profesorado en el proceso de enseñanza y aprendizaje de las Ciencias.

A continuación se detallan algunas de las características más destacadas del papel que jugó el profesor en relación con tres aspectos fundamentales en el desarrollo de las propuestas de enseñanza objeto de investigación: la materia a enseñar, los estudiantes y el proceso de enseñanza y aprendizaje.

El papel del profesorado en relación con la materia a enseñar

Uno de los propósitos con los que se realizó el diseño y planificación de las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* es evitar que los alumnos perciban las actividades como ejercicios aislados que presentan unos contenidos inconexos, coherentes con la Ciencia pero aislados del mundo real y nada útiles para la vida mientras no se trate de salvar los obstáculos que se deben superar para obtener un título académico. Al plantear problemas basados en situaciones, hechos y fenómenos cercanos a la realidad, se pretende despertar el interés de los estudiantes por los contenidos objeto de aprendizaje, fomentar su participación personal y facilitar la labor docente.

Desde el momento en que decidió colaborar en esta investigación, Rodrigo demostró ser plenamente consciente de la importancia de que los estudiantes tengan una visión global del trabajo que realizan en el aula, de la relación entre los distintos contenidos de aprendizaje y los objetivos de las actividades que van a desarrollar.

Durante la implementación de las unidades didácticas, hizo hincapié en la conexión entre las distintas actividades que conforman las secuencias. Dado el alto nivel de abstracción y la gran demanda cognitiva de los conceptos, modelos y procedimientos necesarios para resolver las tareas, se esforzó en compartir con el alumnado la necesidad de estudiar de manera reflexiva todos los problemas planteados. Fomentó el intercambio de ideas y opiniones, planteó nuevos interrogantes y realizó comentarios que, en muchos casos, introducían en el aula la realidad de la experiencia cotidiana. En las reuniones de consenso que mantuvieron profesor e investigadora a lo largo la implementación, se planteó qué contribuciones ayudaban más a que los estudiantes percibiesen la relación entre los contenidos y las dimensiones social y tecnológica del mundo en el que viven.

El papel del profesorado en relación con los estudiantes

Rodrigo conocía las características personales, familiares y académicas de los alumnos de 2º de Bachillerato que constituyeron la muestra de investigación. Cuando tuvo lugar la implementación, llevaba casi cinco meses impartiendo la asignatura de Química a estos alumnos, por lo que disponía de mucha información sobre los conocimientos iniciales de todos. Esto sirvió para adecuar la aplicación de las propuestas en función de sus posibilidades e impartir una enseñanza más personalizada.

Desde el principio se propuso a los estudiantes mantener un diálogo continuo entre ellos y con el profesor. Se intentó en lo posible que todos expresaran sus ideas y opiniones, y que escuchasen con interés las de los compañeros y las del docente. El diálogo que se estableció en el aula perseguía un doble objetivo:

En primer lugar, se pretendía fomentar el uso de las destrezas argumentativas, así que la defensa y la valoración de las distintas aportaciones se debía basar en ideas racionales, independientemente de que fuera el docente o un alumno quien argumentase a favor o en contra de cualquier manifestación; el transcurso del debate se apoyaba en actitudes como el respeto, la tolerancia y la colaboración.

En segundo lugar, el diálogo debía servir para hacer explícita y consciente cualquier diferencia que pudiera surgir entre las diversas aportaciones que se barajaban en el aula, en un proceso dinámico que ayuda también a trabajar en los entornos de las ZDPs de los estudiantes, donde se desencadena el proceso de construcción de conocimiento. El docente utilizaría su intevención y mediación para maximizar el número de situaciones de aprendizaje en las que se pueda promover un desplazamiento de las sucesivas ZDPs.

Para establecer este tipo de diálogo y crear el entorno de trabajo que se pretende organizar (*Resumen: el clima de aula*, pág. 305), el profesor debe demostrar interés no solamente por la materia a enseñar (y a la investigadora le consta que Rodrigo lo transmite desde hace años en el ejercicio de su actividad docente). Es necesario, asimismo, que manifieste abiertamente un interés activo y continuo por lo que los alumnos realizan en el día a día, y que, al mismo tiempo que los anima a desarrollar su trabajo, les dé una relativa seguridad de avanzar en una dirección adecuada y útil. Esta labor exige mantener una interacción constante y cercana con los estudiantes, escuchar sus observaciones, considerar y apreciar sus sugerencias y valorar positivamente sus progresos individuales y grupales, comentando de manera constructiva las dificultades que aparecen.

El profesor exteriorizó desde el principio su disposición a contribuir activamente para crear este entorno comunicativo y abierto orientado hacia un aprendizaje consciente y reflexivo, aun cuando tenía motivos personales para recelar de la disposición de determinados alumnos a contribuir (ver ***Capítulo III***). De hecho, a lo largo de la intervención se produjeron varios momentos en que estos alumnos expresaron objeciones a mantener esta dinámica que, en palabras del profesor, «les obligaba a trabajar los cincuenta minutos». Por ejemplo, Brais y Débora siempre entraban tarde en el aula, aun cuando se encontraban en el pasillo cinco minutos antes de comenzar la clase.

Estas actitudes no se dirigían únicamente contra la dinámica de trabajo de la metodología ensayada. En las entrevistas realizadas a los profesores, se constató que los alumnos citados (además de Berta y a veces Alfonso) manifestaban reiteradamente este tipo de conductas de rechazo al aprendizaje ante otros docentes y otras metodologías con las que se trabajaba en otras asignaturas.

Si las obstrucciones eran implícitas, la respuesta de Rodrigo solía consistir en indiferencia y un discreto rechazo. Pero la oposición a colaborar por parte de Brais, Débora y Berta se hizo más patente en algunos momentos de mayor tensión afectiva, como durante la comunicación de las calificaciones; entonces, estos alumnos

exteriorizaron abiertamente una conducta desconsiderada e irrespetuosa para con el profesor y el funcionamiento del Centro educativo (***Capítulo IV***), y Rodrigo reaccionó de manera categórica ante las palabras despreciativas de Berta y Brais.

Fuera del aula, al comentar estas dificultades con la investigadora, el docente manifestó que las conductas «boicoteadoras» no eran una excepción en la vida cotidiana del centro, y que se debían a que estos estudiantes en particular estaban «instalados» en una concepción utilitaria y «mercantilista» del aprendizaje. En resumen, este tipo de conductas indeseables no se dirigían exclusivamente contra el nuevo entorno de trabajo, aunque sí había una clara relación con él: cualquier contexto que no les fuera propicio para mantener «tranquila y libremente su pasotismo» los motivaba a manifestar de inmediato su resistencia a participar de la dinámica de clase.

A pesar de estas dificultades, Rodrigo siempre se mostró proclive a defender el clima de diálogo en el aula. Antes de la intervención, había mantenido ciertas reservas sobre la posibilidad de establecer «a pleno rendimiento» esta dinámica de trabajo, porque algunos de los alumnos eran «problemáticos», unos por estar dispuestos a «dinamitar» el entorno de trabajo, otros por mantenerse «agazapados» en la inseguridad de sus conocimientos. Estas reticencias fueron remitiendo a lo largo de la fase previa (***Capítulo III***), a medida que Rodrigo se alejaba del miedo a que un menor intervencionismo por su parte generase conocimiento más lentamente. Conforme se desarrollaban las actividades, se convenció de que el aprendizaje que estaban logrando los estudiantes, aun los menos participativos, se basaba en formas de razonamiento más profundas y elaboradas que las que demostrarían si se desarrollara una metodología tradicional. Este convencimiento personal lo motivó a continuar promoviendo el nuevo entorno de trabajo en la extensión en la que el ritmo de esfuerzo y rendimiento intelectual de los alumnos lo permitía.

Además de lo ya comentado, el modelo de intervención docente también tuvo en cuenta otro aspecto del contexto de aula:

En general, los alumnos son sensibles al hecho de comprobar que el profesor, aunque les exige un esfuerzo considerable, también realiza con ellos un esfuerzo semejante, y que cumple sus tareas con eficacia, responsabilidad y diligencia. Con el propósito de demostrarlo abiertamente, Rodrigo siempre presentaba revisados al día siguiente los guiones de trabajo que los estudiantes debían entregar un determinado día, y en sus notas de corrección incluía comentarios escritos que pudieran dar pie a un intercambio de ideas y opiniones que enriquecería el proceso de enseñanza y aprendizaje.

Pero, a pesar de que insistió numerosas veces en la necesidad de rescatar las ideas trabajadas en días pasados, los alumnos se negaban rotundamente a volver a incidir sobre aquellas actividades que ya estaban terminadas (***Capítulo III***). Aunque Rodrigo ya había presentido antes de la intervención que estas dificultades aparecerían en su momento, el hecho de comprobarlas en el aula le supuso una cierta decepción. Los alumnos daban por supuesto que las actividades pasadas ya estaban «bien hechas», y preferían entrentarse a

nuevos hechos y fenómenos «reintentando desde el principio» las destrezas trabajadas con anterioridad. Esta arraigada resistencia a retomar o ampliar el alcance de las propias ideas parece en cierto sentido una rendición personal por parte de los alumnos ante el gran esfuerzo que les exige la nueva dinámica de trabajo, cuando están poco acostumbrados a razonar y argumentar en una clase de Ciencias. La mayoría de ellos mostraban una baja capacidad de autorregulación y una metacognición pobre, por lo que les tuvo que costar un gran esfuerzo cognitivo adaptarse a una dinámica que les obligaba a enfrentarse constantemente a cuestiones abiertas que tenían que analizar en profundidad, y que el profesor solamente les permitía dar por resueltas si utilizaban el razonamiento y la argumentación.

Rodrigo era consciente de la fatiga que sufrían los estudiantes, lo que se acentuaba especialmente en las sesiones de los martes por la tarde y en los momentos en que se realizaban las tareas de mayor demanda cognitiva, sobre todo si venían acompañadas de operaciones matemáticas. Conforme se avanzaba en el desarrollo de las actividades, se pudo observar una evolución positiva y bastante homogénea en la capacidad de trabajo de los estudiantes, que llegaron a completar las actividades en cada vez menor tiempo y con unn profundidad comparable a la que habían mostrado en las primeras (***Capítulo V***).

Pero hay que diferenciar claramente entre el efecto de fatiga debido al esfuerzo cognitivo que supone resolver situaciones problemáticas abiertas, y la apatía o desidia con respecto a todo lo que signifique implicarse en la construcción del conocimiento y realizar un trabajo personal no forzado *ipso facto* por una «bronca» del profesor. Un ejemplo del segundo obstáculo lo encontramos en el hecho de que todas las tareas que se propusieron para que los alumnos elaboraran en casa, aun siendo éstas tan sencillas como consultar la estructura química de un compuesto orgánico (***Capítulos III*** y ***V***), terminaron en fracaso, y prácticamente ningún alumno demostró haber realizado algún trabajo personal extraescolar al margen de pasar a limpio los guiones de trabajo. La única excepción notable fue el informe de prácticas, que todos realizaron porque el profesor lo recalcó expresamente como un paso «indispensable para aprobar el trimestre» (***Capítulo III***).

En lo que respecta a la fatiga producida por el esfuerzo cognitivo, Rodrigo mantuvo en todo momento una actitud paciente, y fomentó un ambiente motivador en el desarrollo de las actividades, animando a los estudiantes a clarificar sus ideas al tiempo que dirigía discretamente las acciones de los grupos cuando no se encaminaban a la búsqueda de soluciones aceptables, sin ofrecer respuestas directas ni sugerir un supuesto "camino correcto". Frente a la apatía e indiferencia generalizada, reprendió al grupo de clase en varias ocasiones. Como no lograba cambios apreciables de actitud censurándoles su conducta, y como este tipo de comportamientos se repitieron varias veces, optó por echar mano al aguijón de la demanda académica (***Capítulos VI*** y ***VII***), y sobre la marcha de la intervención añadió una componente de calificación negativa a aquéllos que no cumplían con las tareas.

El papel del profesorado en relación con el proceso de enseñanza y aprendizaje

Según la teoría de la enseñanza como una actuación asistida (*El nuevo modelo de profesorado*, pág. 63), sobre el docente recae la responsabilidad de utilizar los recursos y estrategias que considere convenientes para ajustar las diferentes demandas de las sucesivas ZDPs al desarrollo del conocimiento. Esta responsabilidad requiere un profesor que sea a la vez observador y supervisor del aprendizaje, y que manifieste una disposición reflexiva sobre las acciones de los alumnos y sobre su propia actuación (Domínguez *et al*., 1990; Pro, 1990; Mellado, 1996, 1998; OCDE, 2005). Ha de realizar un seguimiento continuado tanto del proceso de aprendizaje como de sus propias acciones y de la metodología empleada, y debe tener la capacidad y habilidad para aprovechar el programa de actividades y disponer la organización del aula de tal manera que se maximicen en lo posible las oportunidades para que los alumnos desarrollen sus capacidades. Este objetivo se logra mediante la utilización de los materiales de aprendizaje y el establecimiento de un clima de aula en el cual los estudiantes se sientan cómodos y motivados para indagar y argumentar.

Consecuentemente con este marco teórico, durante la aplicación de las propuestas de enseñanza se abandonó el protagonismo del profesor, y las intervenciones de éste se encaminaron a propiciar el mayor número posible de situaciones de aprendizaje en las que los alumnos tomaran parte activa en el desarrollo de la resolución de los problemas planteados. El papel del docente fue variando a lo largo de las unidades *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, ajustándose a las distintas fases de las estrategias de instrucción seleccionadas (*TAREA* 4.- *Selección de las estrategias de instrucción*, pág. 448):

En las fases de exploración fue bastante discreto. Gradualmente adquirió un mayor grado de intervención sobre el proceso de aprendizaje, durante las fases de indagación; y finalmente transformó el rol de intervención en el de consejero para la resolución de los problemas que se plantearon en las fases de aplicación.

Además de coordinar el proceso de construcción del conocimiento, el profesor se sirvió de las actividades para animar a los alumnos a expresar y poner a prueba sus ideas, hacerles conscientes de la responsabilidad que deben ejercer sobre su propio aprendizaje, y ayudarles a construir una visión adecuada del trabajo científico. Desde las primeras actividades, más experimentales, hasta las últimas, de carácter más teórico, orientó su intervención de manera que los estudiantes terminaran por realizar solos, sin mostrárselas explícitamente (Del Val, 1991), tareas propias de la Ciencia, como la formulación y el contraste de hipótesis, la elección entre varias explicaciones alternativas a un mismo fenómeno o la utilización de teorías científicas en la verificación de una hipótesis.

Con respecto a la construcción del lenguaje científico, de acuerdo con nuestro paradigma, Rodrigo enfatizó en la necesidad de describir los hechos y fenómenos de forma clara, concisa y precisa. Para ello, ayudó a los alumnos a distinguir aquellos aspectos en los que la capacidad explicativa del lenguaje cotidiano no era suficiente, y

aprovechó estas ocasiones para introducir el lenguaje de la ciencia escolar como una herramienta comunicativa mucho más precisa y de mayor potencia descriptiva y explicativa. Se trata de que el alumnado trabaje siendo consciente no solamente de qué expresiones de la Ciencia debe aprender, sino también de cómo, por qué y para qué.

Resumen: el clima de aula

Nuestro punto de vista metodológico y nuestra propia experiencia nos llevan a considerar que el clima de aula es uno de los factores más importantes en el proceso de enseñanza y aprendizaje. Desde el marco teórico que proponemos, se recomienda establecer un clima agradable y relajado, en el que el alumnado no se sienta incómodo o ajeno al desarrollo de las clases. Al contrario, se pretende que se implique más activamente en las tareas, al percibir como normal e incluso interesante el trabajo que se le pide que desarrolle.

Éstas son las principales acciones que realizó Rodrigo con el objetivo de lograr un clima de aula adecuado a los propósitos que acabamos de describir:

Para que los alumnos encontraran en él una persona dispuesta a colaborar con ellos y ayudarlos en las dificultades que se encontraran en su trabajo, se acordaron unas normas básicas de funcionamiento y desarrollo de las sesiones de aula y de las tareas que se iban a realizar. El profesor cumplió voluntaria y escrupulosamente con las normas en todo momento, dando muestra de su implicación personal con una buena marcha de la dinámica de trabajo. También subrayó la importancia de que todos realizaran un intenso trabajo personal para poder desarrollar un buen aprendizaje, y se esforzó por concienciar a los alumnos de la necesidad de aprender de sus errores y de la evolución de sus ideas.

Se grabó en audio y vídeo la aplicación de ambas propuestas didácticas, y esto nos permitió revisar continuadamente, en colaboración con Rodrigo, el enfoque metodológico y su aplicación en el aula. La estrecha colaboración entre el profesor y la investigadora ayudó a ajustar la intervención docente a las circunstancias que iban cambiando en las distintas situaciones de enseñanza y aprendizaje.

Las actividades propuestas se desarrollaron y completaron de manera que resultaran, en lo posible, inteligibles, informativas y atractivas para el alumnado. El profesor (como ya se ha comentado) realizó numerosas aportaciones personales en este sentido y animó a los estudiantes a que hicieran lo propio.

Para relajar y flexibilizar el clima de aula, las interacciones entre el profesor y los alumnos se produjeron a nivel individual o en grupo, según la ocasión lo requería, y mientras se realizaban las tareas, Rodrigo ajustaba su presencia a las necesidades y preferencias de cada uno. Se acercaba a los grupos para escuchar sus comentarios y dificultades, compartía con ellos ideas y experiencias, y verificaba que todos estuvieran intelectualmente activos. En todo momento exteriorizó su voluntad de ayudar, y los estudiantes se acostumbraron enseguida tanto a su presencia cercana, como a la de las

cámaras de vídeo, de cuya existencia se olvidaron ya en la primera sesión. Sin embargo, Rodrigo hubo de reajustar su proximidad a los grupos, porque al principio los alumnos se mostraban muy tímidos ante él y en cuanto se sentían observados detenían de inmediato el debate. Cuando comprobaban que él se retiraba a una cierta distancia, sentían menos la autoridad docente y reanudaban el debate. Al comprobar que el trabajo funcionaba mejor si los alumnos percibían que el profesor no supervisaba a corta distancia su trabajo, Rodrigo pasó a observar sus acciones a una distancia prudente, e intervenía solamente cuando ellos se lo solicitaban o cuando parecían no encontrar una salida a sus discusiones; también si se desviaban o desentendían de sus tareas. Así se creó un ambiente de cierta confianza en el profesor por parte de la mayoría de los alumnos, al margen de algunos problemas actitudinales que en ocasiones obstaculizaron el clima deseable:

En determinados momentos de la intervención (***Capítulo VIII***), mostraron recelo a que Rodrigo supervisara su trabajo, pero en este caso las reticencias no parecen deberse a la timidez ante los juicios del profesor, sino más bien al rechazo de estos alumnos al aprendizaje y a cualquier representación o manifestación de éste, como pueden ser las metodologías de trabajo que les obliguen a trabajar activamente en el aula, la presencia cercana del profesor e incluso la obligación de entrar en el aula y permanecer en ella. Las impresiones personales de los profesores entrevistados apoyan esta interpretación.

Los instrumentos de trabajo

En este apartado se presentan los materiales que hemos diseñado con la finalidad de proporcionar al alumnado las suficientes ayudas para que desarrolle el aprendizaje de la manera más llevadera posible.

Estos materiales (los guiones de trabajo), son documentos que se diseñaron para presentar individualizadamente a los estudiantes las actividades, redactadas de manera sencilla, clara y comprensible. Se preparó un guion de trabajo para cada actividad de *Termoquímica* y *Termodinámica Química*.

En ellos se habilita espacio suficiente para que los alumnos recojan por escrito los resultados de su trabajo personal y realicen un registro sistemático de las incidencias de aula. Así, en los materiales de aprendizaje quedan contenidas las manifestaciones escritas de los estudiantes, y con ello se cubren varias demandas relacionadas con el proceso de aprendizaje generado por las propuestas de enseñanza ensayadas, y con la labor docente y el desarrollo de la investigación de Tesis que aquí se presenta:

Con respecto al proceso de aprendizaje:

Entre otros objetivos, los guiones se diseñaron para convertirse en el cuaderno de trabajo del alumnado y en un material de apoyo y referencia para el estudio; los demás recursos recomendados por el docente (por ejemplo, el libro de texto) se utilizaban como material de consulta. Por su estructura, los materiales de aprendizaje diseñados incentivan el trabajo personal y la autoevaluación, al tener las siguientes características:

En primer lugar, ofrecen espacio suficiente para que los que aprenden puedan escribir sus propias interpretaciones, las aportaciones que se realizan en los debates y las explicaciones del profesor. Además, el último apartado de los guiones brinda la posibilidad contrastar todas las ideas trabajadas e identificar las diferencias entre ellas, lo que ayuda al estudio individual.

En segundo lugar, se pretende que los guiones sirvan de apoyo y referencia para la reflexión sobre las interacciones entre los protagonistas del escenario de aprendizaje, puesto que sirven para registrar las incidencias diarias (Luna, 1989): hipótesis, diseños de experiencias, conclusiones, consultas bibliográficas, representaciones gráficas o esquemáticas, ideas de los debates y las puestas en común, y anotaciones personales.

Para que con los guiones se pudieran alcanzar estas finalidades, era fundamental que el alumnado las comprendiera y compartiera. Al comenzar la parte experimental de la investigación, se comunicó a los estudiantes la importancia de que no se limitaran a apuntar datos, informaciones y resultados sueltos. También se hizo hincapié en la necesidad de que utilizaran el lenguaje de la ciencia escolar en sus comentarios y explicaciones, y se les pidió que además de evitar la realización superficial de las tareas propuestas, aclarasen y justificasen sus ideas lo suficiente como para que el material escrito les ayudara a profundizar en los razonamientos y las acciones que iban desarrollando. Así los guiones les servirían en el estudio para las pruebas escritas del curso y los exámenes de Selectividad. Dado que las PAAU condicionan muchas de las actuaciones de los últimos niveles de enseñanza no universitarios (Pro, 2007), consideramos que era importante insistirles en este punto.

La estructura de los guiones de trabajo permite implementar las secuencias de enseñanza sin perder de vista las fases del diseño y planificación de las mismas. Son materiales de enseñanza coherentes con la dinámica de aula que se pretendía crear para ayudar a los alumnos a desarrollar un aprendizaje significativo en sus componentes cognitiva, social y contextual. Precisamente la elaboración diaria de los guiones se convirtió en una de las tareas habituales entre las que se desarrollaban en el aula.

En la *Tabla 13* (pág. 476) se recoge el guion de la actividad *Fp01* de *Termoquímica*, que es un buen ejemplo para describir la estructura de los materiales de trabajo:

En el texto que encabeza los guiones de trabajo, se plantea la situación problemática mediante la que se pretende construir unos determinados conocimientos. A continuación vienen distintos apartados en los que se formulan cuestiones encaminadas a preparar las oportunidades de que los estudiantes hagan explícitas sus propias hipótesis, predicciones, diseños experimentales, observaciones, descripciones fenomenológicas, razonamientos justificativos, resultados y conclusiones. Primero se trabaja sobre estos apartados en pequeño grupo, debatiendo y anotando las aportaciones personales y las de los compañeros. Con esta dinámica se pretende que los estudiantes adquieran conciencia de que la práctica científica es una actividad compleja y socialmente construida (Latour,

1992; Hodson, 1994, 1998), y se fomenta el uso de las destrezas de razonamiento y argumentación necesarias para construir el conocimiento.

Después del debate en pequeño grupo, se realiza la lectura colectiva de las respuestas, con la finalidad de que cada uno contraste sus opiniones con las de los compañeros y con las del profesor, que va introduciendo las ideas y el lenguaje de la ciencia escolar. Como resultado de las interacciones en gran grupo, los alumnos evalúan sus propias ideas en confrontación con todas las surgidas en el debate. Los resultados de esta reflexión se anotan en el último apartado de los guiones, que está diseñado para recoger las diferencias idiosincrásicas entre las formas de pensar iniciales y las que se van desarrollando como consecuencia del trabajo a nivel personal y en pequeño y gran grupo.

De acuerdo con el planteamiento metodológico propuesto, Rodrigo se preocupó por demostrar que se valoraban todas las aportaciones, sugerencias, decisiones e iniciativas que contribuyeran a hacer a los alumnos responsables de su aprendizaje.

Se les insistió en que se preocuparan por la organización, claridad e inteligibilidad de sus respuestas, pero sin obsesionarse por la limpieza del cuaderno. Fue conveniente insistir en este último punto, a la vista de que algunos alumnos parecían muy preocupados porque el profesor y los investigadores inspeccionarían los materiales de trabajo. Desde el principio fueron plenamente conscientes de que Rodrigo iba a realizar la evaluación a partir de las manifestaciones escritas y orales, y de que la intervención en el aula se desarrollaba en el marco de una investigación de la Universidad de Santiago de Compostela, investigación en la cual los materiales de trabajo servían de instrumentos para la recogida de información. A medida que pasaban los días, en general fueron perdiendo la inquietud por presentar unos materiales de trabajo impecables. Al final de la instrucción, solamente Ana y Adela continuaban muy preocupadas por la limpieza de sus cuadernos. Llama la atención el caso de Mª D., que realizaba todas sus anotaciones a lápiz en el aula, y las presentaba al día siguiente pasadas a limpio y escritas a bolígrafo.

También se hizo necesario asumir la falta de hábito de los estudiantes para expresarse mediante el lenguaje escrito. Para ayudarles, consideramos que era imprescindible concederles un período de acomodación que evitara su rechazo hacia los guiones de trabajo y que al mismo tiempo les diera oportunidades para adquirir, poco a poco, una mayor fluidez comunicativa. Durante la intervención se acordó que enunciaran con tranquilidad y confianza cualquier afirmación, y cuando las circunstancias así lo requerían, el profesor repetía la información para que los alumnos pudieran asimilarla y escribirla. Se les animó a que ordenaran y sistematizaran la información en sus cuadernos antes y después de las explicaciones del docente, sobre todo en lo que se refiere a los datos, tablas y gráficas, y al día siguiente de haber corregido una actividad, Rodrigo les ofrecía recomendaciones específicas sobre estos aspectos.

Pero toda recomendación para que modificaran la información después de haber finalizado una actividad, fracasó por completo, incluso en los casos en los que la

modificación consistiera en expresar una respuesta breve con palabras más precisas o inteligibles. A la vista de los resultados de la investigación, interpretamos que esta negativa a reformular las propias ideas constituye en ciertos casos una resistencia exagerada a recapacitar sobre ellas una vez se hayan establecido las consideradas "definitivas", o sea, las de la ciencia escolar; en otros casos, sin embargo, parece que esta tendencia no encierra nada más allá de una actitud negativa hacia el aprendizaje y los retos y esfuerzos que exige (***Capítulo VIII***).

Con respecto a la labor docente y a la investigación de Tesis que aquí se presenta:

La evaluación del aprendizaje generado durante la implementación de las propuestas ensayadas se basa en el seguimiento continuado de los razonamientos y argumentos y de las acciones de los estudiantes. Los guiones de trabajo del alumnado constituyen un interesante material de evaluación, tanto para los propios estudiantes (autoevaluación) como para el profesor y para los investigadores: ayudaron a Rodrigo a recabar valiosa información sobre la evolución del conocimiento de los alumnos y sobre el grado de consecución de los objetivos de aprendizaje, y sirvieron a los investigadores para la finalidad evaluativa que se pretendía en lo que respecta al aprendizaje generado, al funcionamiento de las propuestas de enseñanza y la acogida de la metodología en las diferentes situaciones de aprendizaje.

El profesor realizaba la evaluación continua de las manifestaciones orales y escritas, y la corrección de los guiones de trabajo se realizaba de manera colectiva, en clase, para convertir la evaluación en un elemento más de las situaciones de enseñanza y aprendizaje. En distintos días, espaciados a lo largo de la intervención, el profesor pidió a los estudiantes que entregaran los guiones de las actividades ya realizadas para que él pudiera corregirlas y calificarlas. La decisión de no revisar diariamente los materiales escritos se consensuó entre Rodrigo y la investigadora, y obedeció a dos razones:

La primera fue mantener la máxima conciliación entre una evaluación continuada y la función de los guiones de trabajo como material de estudio y consulta. Si todos los días Rodrigo se llevaba éstos para corregirlos, los alumnos no podrían disponer de otro material de estudio que el libro de texto. La segunda razón de recoger los guiones de tanto en tanto, fue comprobar si los estudiantes se animaban a mejorar sus aportaciones sobre actividades pasadas en los momentos puntuales en los que el profesor les pasase revista; pero el incentivo de la demanda académica apenas tuvo éxito (***Capítulo VIII***).

Para disponer de la colección completa de los materiales escritos, los investigadores habrían de esperar a la finalización del curso escolar y de las PAAU. Durante la intervención, se escanearon los materiales de trabajo aquellos días que el profesor los recogió para su corrección. De esta manera se pudo comprobar qué modificaciones realizaron los alumnos en sus manifestaciones escritas a lo largo de la intervención y en el período de tiempo que transcurrió entre el final de ésta y la realización de las PAAU (***Capítulo VIII***).

Los referentes legislativos

Se exponen las recomendaciones legislativas que, por su conexión con la concepción de la Ciencia y sus implicaciones didácticas, con el carácter formativo de la Ciencia y con los contenidos objeto de enseñanza y aprendizaje, consideramos más interesantes para diseñar y planificar las dos propuestas ensayadas. Estas recomendaciones legislativas proceden del *Anexo I* del Real Decreto 1467/2007, de 2 de noviembre, *por el que se establece la estructura del Bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas* (MEC, 2007) y *Anexo I* del Decreto 126/2008, de 19 de junio, *por el que se establece la ordenación y el currículo de Bachillerato en la Comunidad Autónoma de Galicia* (XUGA, 2008).

- Respecto de la concepción de la Ciencia y de sus implicaciones didácticas

En la presentación de la materia de Química para 2º de Bachillerato no se encuentran sugerencias legislativas sobre la concepción de la Ciencia y sus implicaciones didácticas; sí en la presentación de la materia de Ciencias para el mundo contemporáneo, tanto en el R.D. 1467/2007 (MEC, 2007) como en el D. 126/2008 (XUGA, 2008):

« […] el significado de las teorías y modelos como explicaciones humanas a los fenómenos de la naturaleza, la provisionalidad del conocimiento científico y sus límites. Asimismo, ha de incidir en la conciencia de que la ciencia y la tecnología son actividades humanas incluidas en contextos sociales, económicos y éticos que les transmiten su valor cultural. Por otra parte, el enfoque debe huir de una ciencia academicista y formalista, apostando por una ciencia no exenta de rigor. Pero que tenga en cuenta los contextos sociales y el modo en que los problemas afectan a las personas de forma global y local. Estos principios presiden la selección de los objetivos, contenidos y criterios de evaluación de la materia.»

«Desde esta perspectiva, débese abordar a resolución de problemas abertos, tal e como se presentan no mundo real e na sociedade actual, conxugando a aplicación de modelos, teorías e procedementos científicos básicos coa contribución doutras ciencias necesarias para comprender a súa complexidade. O tratamento de cuestións da realidade, cun enfoque local e global, axudará ao alumnado a tomar conciencia das distintas dimensións da realidade e fomentará a súa responsabilidade social.»

- Respecto del carácter formativo de la Ciencia

En la presentación de la materia de Ciencias para el mundo contemporáneo:

«Los ciudadanos del siglo XXI, integrantes de la denominada "sociedad del conocimiento", tienen el derecho y el deber de poseer una formación científica que les permita actuar como ciudadanos autónomos, críticos y responsables. Para ello es necesario poner al alcance de todos los ciudadanos esa cultura científica imprescindible y buscar elementos comunes en el saber que todos deberíamos compartir. […] La ciencia no afecta sólo a los científicos, sino que forma parte del acervo cultural de todos.»

«A ciencia e a tecnoloxía son un dos alicerces da sociedade actual e constitúen o eixe do cambio acelerado en que se ve inmersa a humanidade do século XXI. O seu vertixinoso avance produce cambios significativos que inciden no proceso constante de transformación do mundo e afecta o tecido e a estrutura social de maneira máis relevante ca outros campos do saber. […] O desenvolvemento científico e tecnolóxico, en tanto que proporciona unha mellor comprensión da realidade e aumenta a posibilidade de interactuar sobre o ambiente, contribúe de forma innegable á mellora da calidade de vida nas sociedades occidentais. Con todo, non está exento de riscos e incertezas e suscita problemas sociais e ético-políticos máis aló dos laboratorios, en canto que a cidadanía se ve afectada por decisións en que non tomou parte e que inciden no seu escenario e forma de vida, tanto individual coma colectiva.»

En la presentación de la materia de Química para 2º de Bachillerato:

« […] poniendo el acento en […] el papel de la química y sus repercusiones en el entorno natural y social y su contribución a la solución de los problemas y grandes retos a los que se enfrenta la humanidad.»

«La Química amplía la formación científica de los estudiantes y sigue proporcionando una herramienta para la comprensión del mundo en que se desenvuelven, no sólo por sus repercusiones directas en numerosos ámbitos de la sociedad actual, sino por su relación con otros campos del conocimiento como la medicina, la farmacología, las tecnologías de nuevos materiales y de la alimentación, las ciencias medioambientales, la bioquímica, etc.»

« […] proporciona unha ferramenta para a comprensión da natureza das ciencias en xeral, polo que é unha axuda importante na toma de decisións ben fundamentadas e responsables en relación coa súa propia vida e coa comunidade onde vive, co obxectivo final de construír unha sociedade mellor. Percibirá así a importancia que a química ten para resolver problemas humanos e responder a diferentes necesidades sociais. Tamén coñecerá as novas fronteiras que se abren nesta ciencia e como nos beneficia […] En síntese: percibirá como inflúe a química na existencia, na cultura e nas condicións de vida dos seres humanos.»

- Respecto de los contenidos objeto de enseñanza y aprendizaje

En la presentación de la materia de Química para 2º de Bachillerato:

«[…] debe contribuir a una profundización en la familiarización con la naturaleza de la actividad científica y tecnológica y a la apropiación de las competencias que dicha actividad conlleva, en particular en el campo de la química. En esta familiarización las prácticas de laboratorio juegan un papel relevante como parte de la actividad científica, teniendo en cuenta los problemas planteados, su interés, las respuestas tentativas, los diseños experimentales, el cuidado en su puesta a prueba, el análisis crítico de los resultados, etc., aspectos fundamentales que dan sentido a la experimentación.»

«En el desarrollo de esta disciplina se debe seguir prestando atención a las relaciones Ciencia, Tecnología, Sociedad y Ambiente (CTSA), en particular a las aplicaciones de la química, así como a su presencia en la vida cotidiana, de modo que contribuya a una formación crítica del papel que la química desarrolla en la sociedad, tanto como elemento de progreso como por los posibles efectos negativos de algunos de sus desarrollos.»

II.3.2.2. Diseño y planificación de las dos propuestas de enseñanza objeto de la investigación

En este apartado se describe el diseño y la planificación de las propuestas didácticas sobre Termoquímica y Termodinámica Química. El modelo de diseño, planificación y desarrollo que se eligió como referente para estructurarlas (Domínguez Castiñeiras, 2000) está inspirado en los de Sánchez y Valcárcel (1993) y Sánchez (1997), y consta de cinco tareas, que se desarrollan en el siguiente orden:

En primer lugar, se determinó el contenido académico (el qué enseñar). Para ello, se realizó un análisis científico del cual se extrajeron los contenidos concretos, representativos de la ciencia escolar, que centran las propuestas de enseñanza (*Análisis curricular para la selección, organización y secuenciación de los contenidos objeto de aprendizaje: recomendaciones de los diseñadores del curriculum oficial para el nivel de 2º de Bachillerato en Galicia*, pág. 314; *Análisis epistémico del contenido científico para la determinación del contenido académico*, pág. 320). Una vez se hicieron explícitos los marcos conceptual y procedimental deseables que se esperaba ayudar a construir al alumnado, los conocimientos relacionados con estos contenidos se dimensionaron en esquemas de razonamiento y de acción que denominamos referenciales de la ciencia escolar (*Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje*, pág. 380). Los esquemas referenciales sirven como herramienta para formular y secuenciar los objetivos de aprendizaje, para diseñar las actividades de enseñanza y para concretar las estrategias de evaluación de las dos propuestas ensayadas.

En segundo lugar, se analizaron las dificultades asociadas al qué enseñar [*TAREA 2.- Problemática de aprendizaje y de enseñanza de los contenidos (análisis didáctico del contenido deseable)*, pág. 414], esto es, se discutió la problemática del aprendizaje de los contenidos seleccionados (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008a).

La tercera tarea consistió en la selección y formulación de objetivos de aprendizaje (*TAREA 3.- Selección y formulación de los objetivos de aprendizaje*, pág. 442). Cuando se hubo analizado qué enseñar y qué dificultades están asociadas a los contenidos, a partir de los resultados de estos análisis se emitieron los objetivos concretos de aprendizaje que se pretendían alcanzar con las unidades didácticas objeto de investigación.

En cuarto lugar, se consideró cómo llevar al aula los contenidos de manera que se pudieran alcanzar los objetivos planteados. Para ello se planificó la adaptación de las

estrategias didácticas o de instrucción seleccionadas a las secuencias de actividades (*TAREA* 4.- *Selección de las estrategias de instrucción*, pág. 448).

La quinta y última tarea consistió en decidir cómo averiguar hasta qué punto los alumnos alcanzan o no los objetivos propuestos (*TAREA* 5.- *Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje*, pág. 449). Se seleccionaron las estrategias de evaluación del aprendizaje y los instrumentos que se utilizarían para analizar la evolución que experimentarían los conocimientos de los alumnos durante la aplicación de las propuestas sobre Termoquímica y Termodinámica Química.

A continuación se dedica un apartado a la descripción pormenorizada de cada tarea del diseño, planificación y desarrollo de las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y sobre Termodinámica Química, que se elaboraron para el nivel de 2º de Bachillerato y tienen como objetivo la enseñanza de determinados conocimientos sobre los aspectos termodinámicos de los procesos químicos.

TAREA 1.- Selección, organización y secuenciación de los contenidos

La primera tarea en la elaboración de las dos propuestas de enseñanza es la selección, la organización y la secuenciación de unos contenidos concretos que permitan alcanzar las expectativas planteadas (Sánchez y Valcárcel, 1993; Domínguez, 2007).

El contenido académico seleccionado señala los conocimientos que serán objeto de aprendizaje. Como referencia para planificarlo, se han clasificado los conocimientos científicos en conceptuales, procedimentales y actitudinales. La adopción de esta clasificación es una cuestión pedagógica (Coll, Pozo, Sarabia y Valls, 1992) que adquiere sentido en el diseño de las secuencias de actividades, porque ayuda a organizar la integración de los tres tipos de conocimiento. Esta integración permitirá poner de manifiesto el carácter funcional del conocimiento científico.

Las decisiones que han llevado a la selección, organización y secuenciación de los contenidos se basan en un análisis curricular y un análisis epistémico. El primero ha servido para adecuar las propuestas de enseñanza al contexto curricular vigente, y se basa en las directrices de los diseñadores del *curriculum* oficial de 2º de Bachillerato en Galicia (MEC, 2007; XUGA, 2008) según la LOE. El análisis epistémico del contenido obedece a dos razones:

En primer lugar, el campo de conocimiento de la Termodinámica ha sido objeto de discusión en numerosas ocasiones a lo largo de la historia de la Ciencia (*Introducción: la enseñanza de la Termodinámica de los procesos químicos en la investigación*, pág. 120), y las controversias científicas sobre conceptos y enunciados suponen un obstáculo a la hora de diseñar propuestas de enseñanza (Pro, Hernández, y Saura, 1997). En segundo lugar, diversos aspectos asociados a la naturaleza de la Termodinámica complican su enseñanza (*Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica*, pág. 123). Por estos motivos, consideramos que es necesario recurrir a la epistemología de la Ciencia

para concretar la selección, organización y secuenciación de los contenidos. En consecuencia, se revisó el significado de los principales conceptos y enunciados termodinámicos desde el punto de vista de la comunidad científica.

Una vez que se analizaron las recomendaciones de los diseñadores del *curriculum* oficial y se revisó la epistemología de la Ciencia, se planificó la transposición didáctica de los contenidos seleccionados (Chevallard, 1985). Después se dimensionó el conocimiento deseable mediante la elaboración de unos esquemas de razonamiento y acción (Rumelhart y Ortony, 1982) referenciales de la ciencia escolar (Domínguez Castiñeiras, Pro, y García-Rodeja, 2003). Los contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales objeto de aprendizaje para las propuestas *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, se recogen en la *Tabla 9* (pág. 318). Antes de enumerarlos, se detallan los resultados de los análisis curricular (*Análisis curricular para la selección, organización y secuenciación de los contenidos objeto de aprendizaje: recomendaciones de los diseñadores del curriculum oficial para el nivel de 2º de Bachillerato en Galicia*, pág. 314) y epistémico (*Análisis epistémico del contenido científico para la determinación del contenido académico*, pág. 320), que han permitido seleccionarlos:

Análisis curricular para la selección, organización y secuenciación de los contenidos objeto de aprendizaje: recomendaciones de los diseñadores del curriculum oficial para el nivel de 2º de Bachillerato en Galicia

Las dos propuestas didácticas ensayadas se llevaron al aula en el curso académico 2008-2009, cuando estaban implantándose las nuevas enseñanzas de Bachillerato conformes a la LOE (MEC, 2006a), de acuerdo con lo dispuesto en el Real Decreto 806/2006 (MEC, 2006c); pero el grupo de 2º de Bachillerato que constituyó la muestra de investigación seguía las enseñanzas reguladas por la LOGSE (MEC, 1990). Estas circunstancias de adaptación al plan de estudios LOE y de convergencia hacia el nuevo modelo educativo europeo, influyeron en el diseño y planificación de nuestras propuestas, que decidimos ajustar a la normativa LOE.

Así pues, aunque en 2008-2009 el programa de 2º de Bachillerato se regía de acuerdo con lo estipulado por el R.D. 3474/2000 (MEC, 2000), desarrollado en la CC.AA. de Galicia mediante el Decreto 231/2002 (XUGA, 2002), los contenidos de enseñanza y aprendizaje de las propuestas ensayadas se basan en las disposiciones curriculares del R.D. 1467/2007 (MEC, 2007a) y el Decreto 126/2008 (XUGA, 2008).

El R.D. 1467/2007 incluye los temas de Termoquímica y Termodinámica Química como parte del cuarto bloque de contenidos de la materia de Química de 2º de Bachillerato. Este bloque se denomina "Transformaciones energéticas en las reacciones químicas. Espontaneidad de las reacciones químicas". El Decreto gallego D. 126/2008 (XUGA, 2008) recoge aproximadamente los mismos contenidos, aunque añade algunos a los considerados "comunes". En la *Tabla 8* (página siguiente) se transcribe el conjunto de los contenidos, prescritos por los citados R.D. 1467/2007 y D. 126/2008, que tienen relación con las propuestas didácticas ensayadas, incluyendo aquéllos que se encuentran

dentro del bloque de «contenidos comunes, que tienen por finalidad familiarizar a los alumnos con las estrategias básicas de la actividad científica [y] que, por su carácter transversal, deberán ser tenidos en cuenta al desarrollar el resto» (MEC, 2007a).

Tabla 8: relación de los contenidos relacionados con la Termoquímica y la Termodinámica Química para la materia Química de 2º de Bachillerato, según el R.D. 1467/2007 (MEC, 2007a) y el Decreto 126/2008 (XUGA, 2008)

Energía y reacción química. Procesos endo y exotérmicos. Concepto de entalpía. Determinación de un calor de reacción. Entalpía de enlace e interpretación de la entalpía de reacción.
Aplicaciones energéticas de las reacciones químicas. Repercusiones sociales y medioambientales.
Valor energético de los alimentos: implicaciones para la salud.
Condiciones que determinan el sentido de evolución de un proceso químico. Conceptos de entropía y de energía libre.
Resolución de cuestiones, ejercicios y problemas relacionados con los cálculos numéricos elementales en química.
Aplicaciones energéticas de las reacciones químicas: los combustibles químicos. Repercusiones sociales, cotidianas y ambientales.
Utilización de estrategias básicas de la actividad científica tales como el planteamiento de problemas y la toma de decisiones acerca del interés y la conveniencia o no de su estudio; formulación de hipótesis, elaboración de estrategias de resolución y de diseños experimentales y análisis de los resultados y de su fiabilidad.
Búsqueda, selección y comunicación de información y de resultados utilizando la terminología adecuada.
Empleo de las TIC como herramientas de ayuda en la interpretación de conceptos; en la obtención, tratamiento y representación de datos; en la búsqueda de información y en la elaboración de conclusiones.
Repercusión de los diferentes hallazgos científicos en la sociedad y valoración de la importancia de la ciencia sobre nuestra calidad de vida. Análisis crítico de informaciones desde las teorías científicas para poner en cuestión afirmaciones que usan un lenguaje pseudocientífico.
Reconocimiento de la necesidad de un desarrollo sostenible y valoración de las consecuencias ambientales de la evolución tecnológica. Aplicación a la realidad gallega.

En la planificación de las propuestas *Termoquímica* y *Termodinámica Química* también se han tenido en cuenta los contenidos previstos para 1º de Bachillerato, que se refieren solamente al ámbito de la Termoquímica y están organizados en el cuarto bloque de contenidos del R.D. 1467/2007 (MEC, 2007a) bajo el título "La energía y su transferencia. Trabajo y calor"; en el bloque octavo, dedicado al estudio de las transformaciones químicas, no se recogen contenidos relacionados con los aspectos termodinámicos de los procesos químicos. El bloque de contenidos comunes para Física y Química de 1º de Bachillerato coincide exactamente con el de Química de 2º. Para Galicia, el D. 126/2008 (XUGA, 2008) introduce algunos cambios con respecto al R.D. 1467/2008:

Invierte el orden en el que se desarrollan los bloques de Física y de Química, de manera que se trabajen antes los relativos a la Química. Además, se incluye el concepto de *energía de reacción* en el bloque de contenidos dedicado a las reacciones químicas, en relación con la utilización y el aprovechamiento de la energía procedente de las reacciones de combustión. El problema de la *producción* y el *consumo* de la energía se retoma en el bloque octavo "La energía y su transferencia: trabajo y calor". En cuanto al bloque de contenidos comunes, el programa de 1º de Bachillerato omite el tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas.

Al comparar los textos legislativos correspondientes a la LOE (R.D. 1467/2007 y D. 126/2008) con sus análogos de la normativa LOGSE (R.D. 3474/2000 y D. 231/2002), se observa que:

- En ambas reformas, los contenidos se clasifican en conceptuales, procedimentales y actitudinales. Los contenidos conceptuales se organizan en "bloques de contenidos", atendiendo al tema que al hagan referencia. Todos los contenidos procedimentales y actitudinales se agrupan en un único bloque, que en los textos LOGSE se titula "Actitudes, valores y normas" (bloque noveno) y en los de la LOE, "Contenidos comunes". Ambas legislaciones insisten en el carácter transversal de estos dos tipos de contenidos.
- Existe bastante coincidencia entre los textos de los dos planes educativos a la hora de concretar los contenidos sobre Termodinámica de los procesos químicos. Sin embargo, la LOGSE realiza una formulación más concreta en todos los tipos de contenido y un enfoque dirigido al desarrollo de un conocimiento más declarativo en lo conceptual, mientras que la LOE propone un enfoque más general e interpretativo en lo conceptual y una formulación más amplia y flexible para los contenidos procedimentales y actitudinales. El programa LOE correspondiente a la etapa de la ESO incluye la perspectiva del aprendizaje por competencias; en cambio, para el Bachillerato, ésta no se hace explícita, aunque se declara que el Bachillerato tiene por principal objetivo que los alumnos desarrollen y amplíen las competencias básicas para continuar en su desarrollo y permitir un avance más satisfactorio de la formación integral de cada persona, con la mirada puesta en una

vida social adulta o en la continuación de estudios superiores (XUGA, 2008). La nueva formulación de contenidos, menos definida, específica y precisa, exige a los profesores e investigadores un mayor esfuerzo en la toma de decisiones sobre los contenidos concretos a seleccionar y secuenciar.

- En lo que se refiere a los contenidos conceptuales de Termoquímica, las bases de la Termoquímica forman parte de los contenidos específicos de la materia de Física y Química del primer curso de Bachillerato tanto en la LOGSE como en la LOE, en un bloque de contenidos atribuido a la disciplina de Física. Se propone trabajar la relación entre la energía, el calor y el trabajo, e introducir el primer principio de la Termodinámica y el concepto de degradación de la energía desde una perspectiva macroscópica; en el programa de Galicia se cita explícitamente el estudio de los problemas asociados al consumo de los recursos combustibles y la búsqueda de alternativas energéticas para un futuro sostenible, concretando el análisis de estos aspectos CTS para el contexto gallego. La asignatura de Química de 2º de Bachillerato incluye las transferencias de energía en los procesos químicos y presenta su análisis macroscópico y microscópico mediante el concepto de entalpía. Se analizan las implicaciones CTS de los aspectos energéticos relacionados con algunos procesos químicos concretos, como son las combustiones y las reacciones metabólicas de obtención de energía a partir de los alimentos.
- Debido a su complejidad y demanda cognitiva, los conceptos y enunciados de la Termodinámica Química no se tratan en 1º de Bachillerato, aunque se introduce el concepto de degradación de la energía, que es el fundamento macroscópico del segundo principio de la Termodinámica. En el programa de 2º tampoco se alude explícitamente al desarrollo de los principios, ni siquiera del primer principio, que se estudia en 1º de Bachillerato. Se analiza la evolución de las reacciones químicas, y los conceptos de entropía y energía de Gibbs se presentan como criterios para determinar la espontaneidad de cualquier proceso en unas condiciones dadas. Los programas educativos no detallan hasta qué punto ha de profundizarse en la naturaleza de ambas magnitudes termodinámicas, ni si deben abordarse sólo desde la perspectiva de la Termodinámica Clásica, meramente macroscópica, o introducir los modelos de enlace y estructura atómico-molecular de la materia.
- Los contenidos procedimentales propuestos para 2º de Bachillerato incluyen destrezas y estrategias relacionadas con la formulación de hipótesis, la resolución de problemas, el diseño y la elaboración de experiencias, el análisis de datos y resultados y la comunicación de ideas. Se hace explícita la determinación experimental del calor de reacción, y se alude a la aplicación de la Ley de Hess para el estudio de los procesos químicos; no se indica si se ha de realizar el tratamiento cuantitativo relacionado con la predicción de la espontaneidad. El Decreto gallego incide en el uso de las TIC como herramientas de ayuda en el desarrollo de los procesos científicos.

- A nivel de Galicia, el D. 126/2008 especifica algunos contenidos actitudinales no contemplados explícitamente en el listado de contenidos del R.D. 1467/2007: el reconocimiento de la contribución de la Ciencia y la actividad científica a la mejora de la calidad de vida de las personas, el análisis crítico de la información desde un punto de vista científico, y el reconocimiento de la necesidad de alcanzar un modelo de desarrollo sostenible. De forma más o menos explícita, todos estos aspectos se incluyen entre los criterios de evaluación de la LOE.

Del análisis curricular del contenido se han seleccionado los contenidos que se recogen en la *Tabla 9*.

Tabla 9: contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales seleccionados para las propuestas didácticas sobre Termoquímica y sobre Termodinámica Química

Contenidos conceptuales para la propuesta sobre Termoquímica

Magnitudes termodinámicas para la descripción termodinámica de los sistemas.

Transferencias de energía en las reacciones químicas: calor y trabajo.

Funciones de estado.

Energía interna.

Primer principio de la Termodinámica.

Conservación de la energía en los sistemas químicos.

Calor de reacción: variaciones de la energía interna y de la entalpía. Determinación del *calor de reacción*.

Endotermia y exotermia de las reacciones químicas.

Entalpía y procesos químicos: entalpías de enlace y de reacción.

Leyes de la Termoquímica: Ley de Hess y Ley de Lavoisier-Laplace.

Contenidos conceptuales para la propuesta sobre Termodinámica Química

Sentido de evolución de los sistemas químicos: espontaneidad.

Reversibilidad e irreversibilidad de los procesos termodinámicos.

Segundo Principio de la Termodinámica.

Entropía: interpretaciones macroscópica y microscópica.

Tercer Principio de la Termodinámica.

Energía de Gibbs y relación con la evolución de los sistemas químicos.

Ecuación fundamental de la Termodinámica.

Contenidos procedimentales para ambas propuestas

Selección de fenómenos observables y formulación de hipótesis explicativas.

Elaboración de estrategias para la resolución de problemas.

Diseño de experiencias sencillas que pongan de manifiesto el comportamiento termodinámico de los sistemas.

Técnicas de observación y toma de datos de los fenómenos y las experiencias.

Utilización adecuada del instrumental y los aparatos de laboratorio.

Formulación de los conceptos y los principios que permiten explicar el comportamiento termodinámico de los sistemas químicos.

Interpretación de fenómenos químicos con repercusión social y medioambiental.

Elaboración e interpretación de ecuaciones químicas y termoquímicas, ciclos termodinámicos y representaciones gráficas relacionadas con los procesos.

Búsqueda, selección y consulta de fuentes de la información.

Consulta e interpretación de la información de las tablas de datos termodinámicos.

Realización e interpretación de cálculos termodinámicos elementales.

Comunicación de resultados utilizando la terminología y la simbología adecuadas.

Elaboración de informes sobre los trabajos elaborados, y realización de debates.

Contenidos actitudinales para ambas propuestas

Valoración de la investigación científica como medio de producción y divulgación de conocimiento; conciencia de su carácter tentativo, evolutivo y no dogmático.

Valoración de las contribuciones de la ciencia a la mejora de la calidad de vida de las personas y al logro de estilos de vida saludables y de la sostenibilidad.

Valoración crítica de la actividad científica e industrial (sus implicaciones y repercusiones); Valoración crítica de la información científica y de su comunicación.

Interés por la observación de fenómenos naturales.

Interés en el diseño y en la realización de experiencias, la recogida de datos, el manejo de material e instrumentos de laboratorio, la elaboración de informes…

Interés en la utilización de constructos teóricos y en su confrontación con los hechos.

Cuidado y respeto por el material e instrumental de laboratorio.

Valoración de la necesidad de pulcritud, transparencia comunicativa, rigor científico y medidas de seguridad e higiene en la realización de los trabajos.

Respeto por la opinión de los demás y por la diversidad social y cultural.

Respeto por el medio ambiente.

En Didáctica de las Ciencias se considera ampliamente aceptada la necesidad de realizar un proceso de transposición didáctica sobre los contenidos objeto de aprendizaje, a fin de que resulten accesibles, interesantes y significativos para el alumnado. Por ello, una vez seleccionados los contenidos a incluir en las secuencias, se planificó la transposición didáctica de los mismos.

Análisis epistémico del contenido científico para la determinación del contenido académico

En este apartado se revisa el significado científico de los principales conceptos y enunciados termodinámicos.

El análisis epistémico no solamente proporciona valiosa información sobre los obtáculos que la comunidad científica ha tenido que ir superando en la construcción de los conocimientos sobre Termodinámica: también abre una amplia perspectiva sobre la estructura interna de los conocimientos científicos que se reflejan en los contenidos de las propuestas didácticas y ayuda a identificar qué relaciones existen entre ellos. Esta reflexión sobre los conocimientos a enseñar es lo que Bromme (1988) denomina metaconocimiento de la asignatura, y resulta muy útil para concretar la selección y secuenciación de los contenidos de las propuestas sobre Termoquímica y Termodinámica Química, y para facilitar la organización y secuenciación de las actividades de aula atendiendo a la naturaleza y relaciones de los contenidos.

Se desarrolla a continuación el análisis epistémico del contenido deseable sobre Termoquímica y Termodinámica Química:

Termodinámica. Antecedentes históricos

La Termodinámica (de los términos griegos para "calor" y "potencia") se define como la disciplina de la Física que se ocupa de las relaciones entre las propiedades macroscópicas de un sistema material y de los cambios que se producen en las propiedades de equilibrio del sistema como consecuencia de los procesos que éste experimenta (Levine, 2002, p. 1). Se trata de una disciplina esencialmente fenomenológica y su perspectiva es puramente macroscópica, pero sus postulados se pueden complementar con conocimientos del dominio microscópico como el modelo cinético molecular, y con algunos constructos de la Mecánica Estadística que justifican a nivel atómico-molecular los principios termodinámicos y permiten describir los parámetros macroscópicos de los sistemas en términos de las propiedades microscópicas de la materia (Price, 1998, p. 1).

En el estudio los sistemas químicos se conoce como Termoquímica aquella parte de la Termodinámica que analiza sobre la base del primer principio los cambios energéticos que tienen lugar como consecuencia de las reacciones químicas, de la formación de disoluciones y de los cambios de estado de agregación de las sustancias. Se conoce como Termodinámica Química la parte de la Termodinámica mediante la cual se

estudia la evolución que experimentan los sistemas químicos hacia el equilibrio, sobre la base teórica que proporcionan los tres principios de la Termodinámica.

Atendiendo al tipo de procesos que estudia, la Termodinámica suele dividirse en Termodinámica de equilibrio y Termodinámica irreversible; ésta última trata los sistemas que no se hallan en equilibrio y la dinámica de los procesos de cambio.

Dado que el propósito de esta discusión epistémica es exponer las bases científicas de los contenidos termodinámicos que se estudian en la materia de Química de 2º de Bachillerato, solamente hablaremos de la Termodinámica de equilibrio, que es una disciplina macroscópica y en principio independiente de las teorías de la estructura atómico-molecular (Erlichson, 1986). Pero esta investigación tiene por objetivo diseñar, aplicar y evaluar dos propuestas didácticas que ayuden a los estudiantes a interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Para lograr este objetivo, consideramos necesario complementar la perspectiva macroscópica de la Termodinámica Clásica con la perspectiva microscópica de los modelos de partículas, enlace y reacción química. Este enfoque químico de la Termodinámica entra dentro del ámbito de la Química Física (o Fisicoquímica), esto es, de la parte de la ciencia que estudia los principios que gobiernan las propiedades físicas y el comportamiento físico de los sistemas en los que tienen lugar procesos químicos.

Desde el punto de vista de la Física suele considerarse que la Fisicoquímica está dividida en cuatro áreas principales: Cinética, Termodinámica, Mecánica Estadística y Química Cuántica. Nosotros nos situamos en el marco de la Dinámica de los procesos químicos, que abarca tres disciplinas de la Química Física: la Termodinámica Química, que estudia las condiciones en las que los procesos tienen lugar y los intercambios energéticos que se ven involucrados; la Cinética Química, mediante la cual se analiza la velocidad a la que suceden los procesos químicos; y el Equilibrio Químico, que determina en qué extensión suceden las reacciones en las condiciones de estudio.

La Termodinámica surgió como una disciplina experimental de la Física Clásica, y se considera que sus orígenes quedaron establecidos con la memoria *Reflexions sur la puissance motrice du feu* ("Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego"), publicada en 1824 por N. L. S. Carnot. No obstante, a lo largo de los siglos anteriores ya se habían desarrollado varias teorías sobre los fenómenos térmicos, se trabajaba con diversas magnitudes físicas y los aparatos de medición ganaban en sofisticación y precisión.

A comienzos del siglo XVII se definió la temperatura a partir de los estudios relacionados con la utilización de los termoscopios. El primero en introducir una escala termométrica cuantitativa en un instrumento de este tipo fue Sartorio. En aquella época, las medidas experimentales se veían distorsionadas por los efectos de la presión atmosférica, porque los aparatos todavía funcionaban con aire; de hecho, estaban inspirados en el termoscopio que Herón describe en su tratado *Pneumaticos*, rescatado del olvido por G. Galilei a finales del XVI. También datan del siglo XVII los primeros

termómetros, que inicialmente fueron de agua y posteriormente de alcohol (Florencia, *Accademia del Cimento*). Durante el siglo XVIII se elaboraron las escalas termométricas relativas más utilizadas en la actualidad: la escala Fahrenheit, del autor del mismo nombre (quien diseñó el termómetro de mercurio en 1720); la escala Celsius, de J.-P. Christian (en 1743); y la escala Reaumur, de J. A. de Luc (en 1772).

En cuanto a la construcción del concepto de calor, se impulsó a lo largo del siglo XVIII, aunque antes se habían discutido largamente distintos significados del término (ver Cindra y Baierl, 2005). Basándose en las teorías de los atomistas griegos, se propusieron dos definiciones distintas: para unos científicos, el calor era una propiedad de los cuerpos que se observa como manifestación del movimiento de las partículas materiales (Bacon, Kepler…); otros lo consideraban una especie de fluido relacionado con el movimiento (según Galileo) o una oscilación del éter (Newton); algunos, como Gassendi, hipotetizaron sobre la existencia de dos materias térmicas distintas, una productora de calor y otra de frío. Durante el siglo XVII, la teoría más aceptada era la del *calórico*, en la que el calor se concebía como un ente material, un fluido invisible, elástico y sin masa que fluye de unos cuerpos a otros, calentándolos cuando entra en ellos y enfriándolos a medida que se escapa. Las partículas de calórico, indestructibles, se repelen entre ellas y se ven atraídas por las partículas de la materia, lo cual explica la diferente capacidad calorífica de las diferentes sustancias. La cantidad de calórico perdida por el cuerpo caliente es igual a la cantidad de calórico ganada por el cuerpo frío, de manera que el calórico se conserva en cualquier transformación. Gracias a los estudios que se realizaron en el siglo XVII sobre los choques inelásticos, la concepción material del calor se vería sustituida durante el siglo XVIII por la perspectiva cinética, más elaborada y de mucho mayor poder explicativo (Solbes y Tarín, 2008). Pero no fue fácil superar las teorías que intentaban interpretar los fenómenos térmicos en términos de fluidos que se intercambiaban (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Mas, 2007), entre otros motivos porque éstas explicaban, justificaban y predecían satisfactoriamente las observaciones realizadas hasta la fecha (Izquierdo, 1988). El propio Lavoisier, que rechazó la teoría del flogisto a raíz de sus investigaciones sobre la combustión y otros procesos oxidativos, estaba conforme con la teoría del calórico; de hecho, éste figuraba en su tabla de las sustancias simples. No es difícil observar que el denominador común de las teorías del flogisto (debida a Stahl, *circa* 1697) y del calórico es la concepción del fuego o de algún constituyente del fenómeno del fuego como una materia o sustancia elemental. Por ejemplo, según Cavendish, el flogisto era el más ligero e inflamable de los gases conocidos.

En el siglo XIX se enunciaron nuevas teorías del calor como fluido o pseudo-fluido, y tuvieron aceptación incluso entre aquellos científicos que rechazaban abiertamente la teoría del calórico. El caso más famoso es el de los partidarios de la teoría del éter, que atribuían al calor cualidades ondulatorias, en consonancia con los esfuerzos por unificar la física de los fenómenos térmicos y lumínicos (Cotignola *et al.*, 2002). Dado que muchas de las propiedades del obsoleto fluido calórico eran perfectamente

asimilables a las del éter, si se relacionaban los fenómenos térmicos con éste y se desterraba aquél se podía interpretar una gran variedad de fenómenos naturales teniendo en cuenta un solo fluido imponderable.

La primera determinación cuantitativa del calor y su diferenciación conceptual con respecto a la temperatura se deben a J. Black, que en el siglo XVIII estudió la cantidad de calor necesaria para que masas iguales de cuerpos diferentes experimenten la misma variación de temperatura. Con ello, Black introdujo el concepto de calor específico, que luego perfeccionaría Wilcke. También definió el calor latente como la cantidad de calor puesta en juego en los fenómenos de cambio de estado, en los que se intercambia una cantidad de calor sin que la temperatura del sistema varíe. Basándose en la teoría del calórico, Black hipotetizó que este fluido podía alojarse en la materia, donde el termómetro no podía detectarlo (de ahí la denominación de *calor latente*), o en el espacio entre las partículas de materia, donde era libre de fluir hacia el termómetro y hacerse detectable como *calor sensible*.

A. L. Lavoisier y su amigo P. S. Laplace realizaron mediciones experimentales de calores latentes, específicos, de reacción… e inventaron un aparato capaz de medir el calor: el calorímetro. Estas experiencias constituyen los primeros antecedentes de la Termoquímica, que se desarrollaría con profusión en la segunda mitad del siglo XIX.

También a finales del siglo XVIII, Rumford estudió la producción de calor por rozamiento en el torneado de cañones (1798). Las limaduras de hierro procedentes del torneado alcanzaban una temperatura tan elevada que cuando eran recogidas en un cubo lleno de agua eran capaces de hacer hervir ésta. Las observaciones de Rumford no podían explicarse mediante la teoría del calórico, según la cual la cantidad de este fluido se mantenía constante en todos los fenómenos. Como conclusión de sus experiencias, Rumford estableció que la naturaleza del calórico no podía ser material, y recurrió a la teoría mecanicista de los gases que había propuesto D. Bernouilli en 1738. De esta manera explicó que la energía mecánica se transformaba en calor, lo que producía un aumento en el movimiento de las partículas del cuerpo (Solbes y Tarín, 2008); pero no fue capaz de justificar por qué en algunos casos la cantidad de calor se conservaba y en otros se perdía (por el rozamiento).

Sesenta y un años después, H. Davy realizaría nuevas experiencias sobre la generación de calor a partir de la fricción, por ejemplo, entre trozos de hielo que se derretían como consecuencia del rozamiento. De experimentos como éstos concluyó que el calor está relacionado con la fricción y la repulsión. Con los avances teóricos y prácticos de los siglos XVII y XVIII, quedó patente que la teoría del calórico no explicaba de manera satisfactoria cómo se generaba calor a partir de la realización de un trabajo mecánico. Es esta conexión entre los fenómenos mecánicos y los fenómenos térmicos la que da inicio a la Termodinámica como un intento de unificar las interpretaciones científicas de los procesos mecánicos, eléctricos, químicos, térmicos y magnéticos (Furió-Gómez, Solbes y

Furió-Mas, 2007). Además, a lo largo del siglo XVIII se estudiaron en profundidad dos de las formas de transmisión del calor: la conducción (J. Fourier, autor de la *Teoría matemática del calor* en 1822) y la radiación (P. Prevost y W. Herschel). De las leyes de la conducción de Fourier se extrajo la conclusión de que no es necesario hipotetizar sobre el concepto de calor o sus mecanismos de transmisión para conocer la cantidad de calor involucrada, que es proporcional al gradiente de temperatura. De las investigaciones sobre la transmisión por radiación surge una pregunta a la que la teoría del calórico no puede responder: ¿cómo se transforman en ondas las partículas del calórico?

A pesar de todos los argumentos que se plantearon en el siglo XVIII contra la teoría del calórico, ésta no se vio seriamente cuestionada hasta entrado el siglo XIX.

En 1824, en sus *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, Carnot analizó exhaustivamente el funcionamiento de las máquinas térmicas cíclicas partiendo de las bases teóricas del calórico, y llegó a una conclusión que contradecía sus propias premisas: siempre que haya un transporte calórico puede producirse una fuerza motriz dependiente de la diferencia de temperatura e independiente de la fuente de calor. La controversia suscitada por esta publicación enfrentó a los partidarios de la teoría del calórico y los de la teoría cinética, y supuso el principio del fin de aquélla. Carnot denominaba "calórico" a lo que hoy conocemos como energía interna, y "calor" al intercambio de energía producido entre cuerpos de diferente temperatura. Después de la polémica publicación de Carnot, los experimentos de Gay-Lussac, J. P. Joule y J. R. Mayer y los estudios de W. Thomson (más conocido como Lord Kelvin) asestaron el golpe definitivo a la concepción material del calor. La identificación entre éste y la energía interna tardaría en superarse casi un siglo, hasta que Duhem, en 1910, especificó que el calor no es un componente de la energía interna de los sistemas.

En 1840, H. H. Hess enunció la ley experimental que lleva su nombre, por la cual el calor involucrado en cualquier reacción química es independiente del camino por el que ésta se produce. Poco después, J. R. Mayer (en 1842) y J. P. Joule (en 1840 y 1843) demostraron que existe una equivalencia en la transformación del trabajo en calor. Esto se tradujo como una ley de conservación de la energía que luego se enunció como la primera ley de la Termodinámica y redujo la ley de Hess a una consecuencia directa de ella.

Con las investigaciones de Joule y Mayer, los conceptos de energía y fuerza se alejaron mutuamente y la concepción material del calor perdió plausibilidad. En 1843, Clapeyron publicó su fórmula para calcular el calor latente en los cambios de estado. Fue este mismo autor quien propuso la noción de cambio reversible.

La controversia entre los partidarios del calórico y de la teoría cinética del calor quedó definitivamente zanjada en 1850, cuando R. Clausius formuló las bases de lo que denominó "segunda ley fundamental de la teoría mecánica del calor". Thomson realizaría una formulación independiente para el mismo enunciado, además de la escala absoluta de temperaturas, la llamada escala Kelvin. La primera ley y la segunda configuraron las

bases teóricas de un nuevo cuerpo de conocimientos que ya se conocía como Termodinámica, y que enseguida articuló los conceptos macroscópicos de temperatura, presión y volumen en el estudio de los gases, las máquinas térmicas y otros sistemas de interés sociocientífico.

Daba comienzo así un nuevo período en la historia de la Física, caracterizado por la profusión de estudios acerca de los aspectos energéticos de los procesos físicos. El concepto de energía, introducido por Young en 1807, deriva de la relación entre calor y trabajo, y se enuncia como una función general de los sistemas que mide la capacidad de éstos para realizar trabajo. Una vez superado el viejo concepto de *vis viva* de Huygens y Leibniz, la energía se convierte en una noción clave, pues sirve para explicar fenómenos mecánicos, eléctricos, magnéticos y químicos (Erlichson, 1984; Alonso y Finn, 1997; Furió-Gómez, Solbes y Furió-Mas, 2007). Pero, dado que la energía es una entidad abstracta, imposible de percibir o medir por métodos directos, y además multifacética, no se ha alcanzado un acuerdo en su definición. En cada especialidad científica se manejan distintas definiciones operativas que resultan útiles en contextos concretos. Sin embargo, a pesar de que no se disponga de una idea clara sobre qué es la energía, la Termodinámica tiene ya más de dos siglos de historia y continúa resolviendo con éxito numerosos problemas de base científica. Quizá la definición actual más versátil es la que enuncia la energía como la capacidad de los sistemas para producir transformaciones o cambios (Doménech *et al.*, 2003).

El estudio termodinámico de los sistemas químicos se vio impulsado por las contribuciones de Lord Kelvin, R. Clausius, L. Boltzmann y W. Gibbs, que incorporaron aspectos derivados de la hipótesis atómico-molecular en el esqueleto teórico de la Termodinámica; así nació lo que en su día se dio en llamar Termodinámica especial y que ahora conocemos como Mecánica Estadística (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Mas, 2007). Gracias a la nueva perspectiva microscópica, se introdujo una formulación más refinada de los enunciados termodinámicos, así como nuevas funciones relacionadas con la energía de las transformaciones físicas y químicas: la *energía libre* de Kelvin, en 1855; la entropía, que introdujo Clausius en 1865 en relación con el segundo principio; la función de Helmholtz, en 1872; y la función de Gibbs o *entalpía libre*, en 1876. Utilizando estas nuevas funciones se pudo analizar más detalladamente los fenómenos térmicos y predecir el sentido en el que tiene lugar cualquier tipo de proceso en unas condiciones dadas.

Por otra parte, se generalizó la perspectiva termodinámica en el estudio del equilibrio químico en función de la temperatura (con la ecuación de van't Hoff, de 1884) y del potencial químico de las sustancias que intervienen en la reacción, con la ecuación de Gibbs-Duhem, en la cual la energía de Gibbs molar equivale al potencial químico y se expresa la variación de la energía de Gibbs de un sistema cuando se modifican de manera infinitesimal la temperatura, la presión y/o el número de mol. Se comenzaron a analizar desde el punto de vista termodinámico las transiciones de fase y los fenómenos asociados a las propiedades magnéticas de las sustancias (ecuación de Clausius-Clapeyron,

ecuaciones de Ehrenfest, teoría de Landau…) También se elaboraron enunciados sobre la influencia de la concentración, la presión y la temperatura en el sentido del desplazamiento de un proceso que sucede en un sistema inicialmente en equilibrio y luego afectado por una perturbación externa (principio de Le Châtelier, hacia 1888, que sería perfeccionado posteriormente por Gibbs y M. Planck).

Desde principios del siglo XX se consideró afianzada la vinculación entre las teorías sobre la estructura corpuscular de la materia y la Termodinámica, y ésta amplió considerablemente su radio de acción. En 1901, Lewis introdujo las nociones de fugacidad y de actividad química, mediante las que se puede aproximar el comportamiento de los gases reales como gases ideales. Como consecuencia, se hicieron multitud de cálculos sobre los calores específicos de gases reales, de líquidos y de sólidos (Van Laar, Nernst, Debye, Einstein…)

Por su parte, Boltzmann elaboró una novedosa explicación mecánico-estadística del segundo principio de la Termodinámica (1866). Los energetistas, partidarios de la concepción de esta disciplina como una ciencia fundamental e independiente de la mecánica, rechazaban el uso de los modelos mecánicos y el modelo atómico-molecular de la materia (Furió-Gómez, Solbes y Furió-Mas, 2007). Por ello, criticaron duramente las contribuciones teóricas de Boltzmann y de los demás termodinámicos atomistas (Solbes y Tarín, 2008). Las controversias entre atomistas y energetistas continuaron a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX (Moreno, 2006), y hubo que esperar a la teoría de Poincaré sobre el tiempo recurrente para que el debate se considerara cerrado.

En 1913, M. Planck recogió las contribuciones de Boltzmann y de Nernst, quien (asombrosamente) se había basado en el positivista antiatomista Berthelot para enunciar el tercer principio de la Termodinámica (Esteban Santos, 2001).

Desde comienzos del siglo XX hasta la actualidad, la Termodinámica Estadística se ha ampliado con nuevas formulaciones de los principios por parte de autores como Carathéodory, Fermi, Schrödinger o Sommerfeld (Ulloa Lugo, 2006), y se ha complementado con las ideas procedentes de la teoría de la Relatividad Especial de Einstein (Prado Orbán, 2010).

Los sistemas termodinámicos. Definición y descripción mediante variables

Como la Termodinámica es, en esencia, una de las disciplinas de la Física macroscópica Clásica, solamente estudia sistemas que constan de un gran número de partículas. El primer problema de la Termodinámica es definir y describir el sistema objeto de estudio.

En Termodinámica, se denomina sistema a la parte del universo que es objeto de estudio. Todo sistema se halla rodeado por paredes reales o imaginarias que lo delimitan, así que es posible definir un entorno (también llamado medio o alrededores) como la porción de universo no perteneciente al sistema y que puede interaccionar con el mismo

realizando transferencias de materia y/o energía a través de la pared. Una pared puede ser rígida o no rígida (según sea móvil o no, respectivamente), y permeable o impermeable al paso de materia. Además puede ser diatérmica o adiabática dependiendo de si permite o no, respectivamente, el paso de energía por calor. Desde el punto de vista físico, una pared adiabática es una idealización que sólo se puede asimilar en la realidad con un recipiente de las características de un vaso Dewar, un termo, un calorímetro, etc.

En función de su interacción con el medio, los sistemas termodinámicos se clasifican en sistemas abiertos, que son aquellos que pueden verificar transferencias de materia y energía con los alrededores; sistemas cerrados, si en ellos no son posibles las transferencias de materia, pero sí las de energía; y sistemas aislados, que no interaccionan con el entorno mediante transferencias de materia ni energía. Para ser aislado, un sistema material debería o bien estar rodeado por una pared rígida, impermeable y adiabática, o bien comprender todo el universo (el cual es en sí un sistema aislado). Los sistemas aislados son una idealización porque cualquier material, por aislante que sea, tiene una conductividad térmica no nula, se ve influenciado por campos externos y permite el paso de rayos cósmicos. La única excepción es el universo en el cual nos encontramos, pues si un sistema estuviera completamente aislado, sería inobservable.

Un sistema termodinámico tiene una serie de características que varían con el tiempo a medida que cambian las condiciones del medio. Así pues, para describir un sistema primero se debe definir en qué estado se encuentra. El estado termodinámico se define fijando los valores que adoptan las variables termodinámicas (también llamadas propiedades termodinámicas o parámetros termodinámicos), que son aquellas propiedades del sistema que no dependen de la evolución pretérita o futura del mismo, sino solamente de su presente. Dos sistemas A y B termodinámicamente separados se hallan en el mismo estado termodinámico cuando el valor de cada una de las propiedades termodinámicas del sistema A es exactamente igual al valor correspondiente a la misma propiedad termodinámica del sistema B.

En resumen, el estado termodinámico es la condición de un sistema para la cual se han fijado los valores de las variables termodinámicas, que representan los grados de libertad del mismo. Los grados de libertad de un sistema se pueden calcular mediante la regla de Gibbs, que establece: $F = C - P + 2$, siendo F el número de grados de libertad, esto es, el número de variables intensivas que pueden variar de manera independiente sin afectar al número de fases; C es el número de componentes del sistema y P el número de fases presentes. Por cada grado de libertad se puede sustituir una variable intensiva por una extensiva sin que se pierda información sobre el estado (Wood y Battino, 1996).

La Termodinámica de equilibrio estudia únicamente aquellos sistemas que se hallan en estado de equilibrio. La única condición de equilibrio para un sistema aislado es que sus propiedades macroscópicas permanezcan constantes en el tiempo. Los sistemas no aislados han de verificar además una segunda condición: sus propiedades

macroscópicas deben permanecer invariables cuando se elimina el contacto entre el sistema y el medio. Si esta condición no se verifica, el sistema está en un estado estacionario. La relación funcional que se establece entre los parámetros termodinámicos de un sistema en equilibrio constituye una ecuación de estado del mismo.

Un sistema se halla en estado de equilibrio termodinámico cuando se verifican simultáneamente los equilibrios mecánico, material y térmico:

En el equilibrio mecánico, las fuerzas en el interior del sistema y las que actúan sobre él están equilibradas, por lo que no existe aceleración ni turbulencias en el sistema, y la presión a lo largo del mismo es uniforme e igual a la presión del entorno. A la hora de estudiar los sistemas químicos despreciaremos los efectos que ejercen sobre ellos los campos eléctricos y magnéticos externos, así como el campo gravitatorio terrestre.

En el equilibrio material, no suceden reacciones químicas globales en el sistema ni se produce transferencia neta de materia desde una parte de éste a otra; las concentraciones de las especies químicas son constantes en las diferentes partes.

El equilibrio térmico implica que no varían las propiedades del sistema ni de sus inmediaciones. Si existen distintas partes de un sistema separadas por una pared térmicamente conductora, solamente se verifica el equilibrio térmico si no varían las propiedades de cada una de las partes.

Existen estados de falso equilibrio, también conocidos como equilibrios metaestables, en los cuales se produce un cambio de estado tan lento que las variables termodinámicas permanecen aparentemente inalteradas en intervalos de tiempo breves.

La principal limitación de la Termodinámica es que no aporta información sobre la rapidez con que se alcanza el equilibrio. El concepto de espontaneidad indica solamente que un proceso tiene lugar en unas condiciones dadas, pero no informa ni sobre la velocidad a la que sucede ni sobre la energía de activación. Así, si el proceso es cinéticamente desfavorable (esto es, si la velocidad de conversión es cercana a cero), puede que transcurran del orden de semanas, meses o años hasta que comiencen a apreciarse cambios significativos en las propiedades macroscópicas del sistema; y si el proceso es termodinámicamente espontáneo pero su energía de activación es muy elevada, no se observará cambio alguno hasta que se cumplan unas condiciones tales que permitan vencer la energía de activación. A este respecto, la Termodinámica no permite realizar predicciones. La velocidad de los procesos es materia de estudio de la Cinética.

Cualquier sistema puede describirse utilizando las variables termodinámicas, entre las que destacan la temperatura T, la presión p, el volumen V, la composición química del sistema, la masa m, el número de mol n… Las variables termodinámicas se consideran extensivas o intensivas según dependan o no de la cantidad de materia total presente en el sistema. Por ejemplo, son variables extensivas la masa m, el volumen V, la energía total del sistema E; o cualquier propiedad aditiva cuyo valor total es igual a la

suma de los valores correspondientes a las distintas partes en que se divida el sistema. Como variables intensivas podemos citar la presión p, la temperatura T, la densidad ρ y en general toda propiedad cuyo valor no se altere al dividir el sistema. Cualquier variable extensiva puede expresarse como intensiva si se la divide entre el número de mol del sistema, para las sustancias puras, o entre la masa del sistema; en este último caso se dice que la cantidad extensiva aparece expresada como cantidad específica (*Handbook of Chemistry and Physics*, 1999-2000).

Cuando todas y cada una de las propiedades intensivas de un sistema son constantes a lo largo de éste, el sistema es homogéneo. Un sistema heterogéneo o inhomogéneo puede constar de distintas partes, denominadas fases, cada una de las cuales es homogénea. A su vez una fase puede constar de varias partes separadas, como sucede en el caso de un conjunto de cristales de sal en equilibrio con una disolución: todos los cristales forman parte de la misma fase. Entre las fases existe una capa del espesor de unas pocas partículas, llamada interfase, tal que en dirección normal a ella se produce una variación gradual de las propiedades del sistema. Pero en general el efecto de la interfase sobre las propiedades termodinámicas globales es despreciable, salvo que se pretendan estudiar fenómenos interfaciales como los de tensión superficial.

Todas las variables termodinámicas son funciones de estado, puesto que el estado de un sistema queda perfectamente definido cuando todas sus variables adoptan valores fijos. El valor de una función de estado, por definición, depende únicamente del estado presente, no de la historia del sistema. Obsérvese que la definición de las variables termodinámicas como funciones de estado no analiza el significado fisicoquímico de las mismas: solamente las declara como funciones de cantidades mensurables e independientes del camino (Wood y Battino, 2001). Toda función termodinámica viene definida tal que es función lineal de propiedades del sistema, tal que la integración de la diferencial correspondiente puede escribirse como una suma de términos, cada uno de los cuales depende solamente de una propiedad controlable del sistema.

Procesos termodinámicos

Cuando el valor de alguna de las propiedades termodinámicas del sistema varía, cambia el estado y se considera que el sistema experimenta un proceso termodinámico. El camino o trayectoria del proceso está formado por una serie de estados termodinámicos intermedios a través de los cuales el sistema evoluciona desde un estado inicial hasta un estado final. Un proceso termodinámico queda totalmente especificado cuando se indican los estados inicial y final del sistema, así como el camino seguido en la transformación. En un proceso cíclico, el estado final del sistema es el mismo que el inicial, y por tanto la variación de cualquier variable termodinámica en un proceso cíclico es cero.

A diferencia de las variables termodinámicas, cuyas variaciones en un proceso sólo dependen de los estados inicial y final, las magnitudes calor q y trabajo w sí dependen del camino mediante el cual se realiza el cambio de estado termodinámico. Así, calor y trabajo

no son función de estado sino de la trayectoria, y no pueden considerarse variables termodinámicas. Recuérdese que al representar un proceso cíclico en un diagrama *P*-*V*, el trabajo viene representado por el área del ciclo, que no es nula.

Las magnitudes calor y trabajo sólo se ponen de manifiesto en la frontera entre sistema y entorno, y únicamente cobran significado cuando el primero experimenta una transformación termodinámica. No tiene sentido hablar de contenido de calor o de trabajo de un sistema, puesto que *q* y *w* son procesos de transferencia de energía entre el sistema y su entorno, ya sea como consecuencia de una diferencia de temperatura (en cuyo caso se habla de una transferencia de energía por el proceso de calor), o debido a una fuerza macroscópica que actúa a lo largo de una distancia, esto es una transferencia de energía por el proceso de trabajo, entendido éste como externo; el trabajo interno al sistema no es objeto de la Termodinámica porque se refiere al trabajo necesario para superar las interacciones intermoleculares. Así pues, podemos considerar el calor como un trabajo realizado a nivel molecular (Levine,2002, p. 42 y ss.).

Tampoco es adecuada la expresión *flujo de calor*, que deriva de la teoría del calórico. En realidad, lo que se produce es una transferencia de energía por el proceso de calor debido a una diferencia de temperatura.

El criterio de signos convencional para las magnitudes *q* y *w* es el recomendado por la IUPAC desde 1970, que considera positivos el trabajo y el calor si la energía fluye del entorno al sistema, y negativos si lo hace en sentido contario.

La realización de un proceso conduce, al cabo del tiempo, a un estado final de equilibrio termodinámico caracterizado por la no variación de las propiedades macroscópicas del sistema. Desde el punto de vista macroscópico, el sistema se observa totalmente estático; pero a nivel microscópico el estado de equilibrio es dinámico, en el sentido de que las partículas continúan en movimiento. Dado que las variables termodinámicas ofrecen información en términos de promedio macroscópico del movimiento microscópico, sus valores permanecen constantes en el estado equilibrio. En rigor, se producen pequeñas fluctuaciones cuyo valor relativo es despreciable, excepto en las interfases, cerca de los contornos de fase.

Los procesos termodinámicos suelen clasificarse en función de las propiedades que permanecen constantes durante el mismo. Así, en un proceso isotérmico, T = cte a lo largo del proceso. En un proceso isocórico, V = cte. En un proceso isobárico, p = cte. Además, se define un proceso adiabático como aquél para el cual se cumple que el sistema no verifica transferencias netas de energía por calor ($q = 0$).

Enunciados termodinámicos sobre las transferencias energéticas

En Termoquímica y Termodinámica Química se estudian las transferencias energéticas que se producen en los sistemas materiales como consecuencia de los procesos químicos. Las bases teóricas de las Termodinámica son sus tres principios, cada uno de los

cuales hace referencia a un aspecto diferente de la naturaleza y las características de los intercambios energéticos que suceden durante los procesos y utiliza algunas variables para realizar los balances de las transferencias energéticas. Las variables termodinámicas principales son la energía interna *U*, la entalpía *H*, la entropía *S* y la energía de Gibbs *G*.

A continuación se exponen los principios de la Termodinámica y las leyes de la Termoquímica, sus definiciones y los significados macroscópico y microscópico de las variables termodinámicas implicadas en los enunciados.

- El principio cero: temperatura y equilibrio térmico

El principio cero es una generalización de la experiencia que fue enunciada después de los demás principios. Aunque no constituye un enunciado fundamental de la Termodinámica, puede considerársele el principio esencial, en el sentido de que es el que introduce la temperatura empírica de Carathéodory como función de estado de los sistemas mediante la cual se determina si se encuentran en equilibrio térmico entre sí.

Por definición se considera que dos sistemas están en equilibrio térmico entre sí, si y sólo si tienen la misma temperatura. Supongamos que dos sistemas A y B, puestos en contacto mediante una pared térmicamente conductora, se hallan en equilibrio térmico entre sí. Consideremos también un tercer sistema C que se halla en equilibrio térmico con el sistema B. Por la definición de temperatura, asignaríamos el mismo valor de temperatura a los sistemas A y B, y a los sistemas B y C. Por lo tanto, los sistemas A y C tienen la misma temperatura y, si se los pone en contacto por medio de una pared conductora, se verifica experimentalmente que se hallan en equilibrio térmico entre sí. Esta generalización de la experiencia constituye el principio cero de la Termodinámica:

«Si dos sistemas se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, entonces se encuentran en equilibrio térmico entre sí.»

En cuanto a los significados macroscópico y microscópico de la variable temperatura, el lector encontrará una detallada exposición en la discusión del contenido epistémico de la Tesis Doctoral de Domínguez (2000). Aquí solamente haremos un breve resumen de los significados de las variables termodinámicas básicas temperatura *T*, presión *p* y volumen *V*. Para facilitar su lectura, el resumen se recoge en la *Tabla 10*.

Tabla 10: significados macroscópico y microscópico de las variables termodinámicas temperatura T, presión p y volumen V del sistema

Variable	Significado macroscópico	Significado microscópico
T	manifestación macroscópica de la energía cinética promedio de las partículas	indica la energía cinética promedio de las partículas del sistema
p	magnitud de la fuerza normal por unidad de área que ejerce el sistema	indica la fuerza total que ejercen las partículas del sistema al chocar contra la superficie de la pared
V	espacio que ocupa el sistema	indica el espacio por el que se mueven las partículas del sistema

- El primer principio: energía interna y entalpía, conservación de la energía

Si se pretende realizar un balance energético básico de las transferencias de energía que experimentan los sistemas materiales en los procesos físicos o químicos, primero hay que definir cuál es la energía total de un sistema en un estado termodinámico dado.

Sobre un sistema termodinámico pueden definirse su energía cinética macroscópica *K*, debida a la masa y velocidad del mismo (para realizar el tratamiento matemático se toma la velocidad de su centro de masas); la energía potencial macroscópica *V*, debida a la posición del sistema (en realidad, de su centro de masas) con respecto a campos externos de fuerzas conservativas, a saber, campos gravitatorio, eléctrico, magnético; y una energía interna *U*, a la que contribuyen las energías moleculares electrónica, translacional, vibracional y rotacional, junto con la energía relativista de la masa en reposo de los electrones y del núcleo, y la energía potencial de interacción entre las partículas. Las interacciones intermoleculares también influyen en el valor de *U*, disminuyéndola porque generan un pozo de potencial dentro del cual cada partícula experimenta un movimiento de vibración propio que implica energías cinética y potencial individuales (Levine, 2002, p. 70). Para los gases, esta contribución energética a *U* depende de la fuerza de las interacciones, pero de todas maneras es menor que en los líquidos y en los sólidos, en los cuales hay mayor proximidad relativa entre las partículas.

En todo caso, la energía total *E* del sistema de partículas será: $E = K + V + U$

Si consideramos despreciable el efecto del campo gravitatorio terrestre sobre el sistema, podemos afirmar que en general los sistemas químicos se hallan en reposo y en ausencia de campos externos. Así pues, la única contribución a la energía total de un sistema químico es la energía interna *U*, propiedad extensiva del mismo que es debida a los movimientos moleculares y las interacciones intermoleculares. En este sentido, *U* proporciona la principal conexión entre la Termodinámica Clásica y la dinámica atómico-molecular. La variación de la energía interna de un sistema se puede explicar en términos de colisiones entre partículas y emisión de radiación, es decir, de procesos microscópicos que a nivel macroscópico se traducen como calor y trabajo (Waite, 1985).

La autoría de la formulación de la energía interna no está clara: podría deberse a Helmholtz (en 1847) o a Clausius (en 1850). Su definición como función de estado según Clausius se basa en la conversión del calor sensible absorbido por un sistema, esto es, el calor relacionado con un aumento de temperatura, en trabajo interno, que es el trabajo necesario para vencer las atracciones intermoleculares. Al hacer el balance entre el calor sensible y el trabajo interno, dejando a un lado la otra contribución al calor latente, que es el trabajo externo realizado por el sistema sobre el entorno, se observa que este balance solamente depende de los estados inicial y final del sistema y es, por tanto, una función de estado que pasaría a llamarse energía interna *U* (Cotignola *et al.*, 2002).

Una forma de hacer variar la energía interna de un sistema consiste en alterar la masa del mismo, adicionándole o extrayéndole materia. Dado que habitualmente se

trabaja con sistemas cerrados, en los cuales la cantidad de materia permanece constante, en Química sólo se puede variar la energía interna mediante calentamiento o realización de trabajo sobre ellos. En los términos microscópicos que proporciona el modelo cinético molecular, el calor y el trabajo se pueden definir como procesos aleatorios o no direccionales de transferencia de energía interna entre sistema y entorno (Waite, 1985).

La unidad del SI para la energía interna U es el J. La energía interna es una propiedad extensiva del sistema, puesto que depende de la cantidad de materia (de partículas) de éste. Para trabajar con U como magnitud intensiva, el sistema debe estar constituido por una sustancia pura de la cual se pueda determinar el número de mol n. Se define la variable intensiva energía interna molar, $U_m = U/n$, que depende de p y T.

Primer principio de la Termodinámica

La Termodinámica, por su naturaleza macroscópica, no requiere conocer la naturaleza de U, sino solamente la ΔU asociada a un proceso. Los métodos para obtener esta información son proporcionados por el primer principio:

«*En un sistema termodinámico puede definirse una función de estado extensiva llamada energía total del sistema E tal que verifica, para cualquier proceso en un sistema cerrado, que su variación es igual al cómputo total de las transferencias energéticas de calor y trabajo:*

$$\Delta E = q + w$$»

donde ΔE es la variación de energía del sistema, q la energía ganada por calor y w la energía ganada por el trabajo realizado sobre el sistema, sin computar el trabajo realizado por fuerzas conservativas relacionadas con la energía potencial V. Cuando actúan sólo fuerzas conservativas, la suma de la energía cinética y de la energía potencial del sistema permanece constante durante el movimiento (conservación de la energía mecánica).

Dado que ni la masa ni la energía se pueden crear ni destruir aunque se produzcan interconversiones masa-energía, los efectos de la relatividad especial de Einstein no invalidan la aplicación del primer principio de la Termodinámica. Simplemente se ha de introducir el concepto de equivalencia de masa y energía: toda masa tiene una energía $E = mc^2$ asociada, y la masa-energía se conserva. Desde la perspectiva relativista, los principios clásicos de conservación de la masa y la energía quedan unificados, de tal manera que en cualquier sistema aislado, si se verifica la conservación de la energía o la conservación de la masa, se verifican ambas (Warren, 1976).

La experiencia demuestra que siempre que un sistema sufre una transformación, la suma $q + w$ es una función de estado, porque depende sólo de los estados inicial y final, sea cual fuere la trayectoria del proceso.

Para cualquier proceso se cumple que $\Delta E_{\text{sistema}} + \Delta E_{\text{entorno}} = 0$, es decir, la energía total del universo se conserva:

$$\Delta E_{\text{universo}} = \text{cte}$$

La expresión del primer principio de la Termodinámica para un sistema cerrado, en reposo y sin influencia de campos externos es:

$$\Delta U = q + w$$

Dado que la energía interna U es función de estado del sistema, ΔU sólo depende de los estados inicial y final, y es independiente del camino seguido. Así pues, en un proceso cíclico se cumple que $\Delta U_{ciclo} = 0$.

Si se define un proceso infinitesimal, la expresión que indica la variación infinitesimal de la energía interna (∂U) para un sistema cerrado cuando éste absorbe una cantidad infinitesimal de calor ∂q y se realiza sobre él un trabajo infinitesimal ∂w es:

$$\partial U = \partial q + \partial w$$

Quedan desarrollados los significados macroscópico y microscópico de U cuando definimos ésta como la suma de las energías de las partículas que componen el sistema. Pero en el nivel microscópico en el que opera U han de valorarse los efectos cuánticos, porque las cantidades de energía posibles de una partícula no pueden tomar valores en un intervalo continuo sino que están *cuantizadas*, esto es, restringidas a ciertos valores o niveles. En un sistema compuesto por un gran número de partículas, puede definirse una distribución de éstas entre los niveles de energía permitidos en las condiciones dadas. Al aumentar la temperatura del sistema, aumenta el número de partículas en los niveles superiores de energía, por lo que la energía media de las partículas aumenta y la energía interna U del sistema también.

En un sistema donde no se produce una reacción química, las variaciones de energía interna vienen dadas mayoritariamente por cambios en las cantidades de energía vibracional, translacional y rotacional de las partículas. El gran salto de energía que existe entre los distintos niveles electrónicos hace que la contribución de la variación de energía electrónica a la variación de energía interna permanezca constante en un rango de temperaturas muy amplio. Pero si en el sistema ocurre una reacción química, las energías electrónicas de los productos difieren significativamente de las de los reactivos, y por ello la variación de la energía interna U se debe sobre todo a la variación de la energía electrónica del sistema.

Para terminar con este apartado, indicaremos que el primer principio de la Termodinámica constituye un principio de conservación de la energía para los sistemas, probado hasta una precisión extrema y aparentemente generalizable a nivel atómico; de ahí el enunciado debido a R. Clausius (Rodríguez Renuncio *et al.*, 2000, p. 62):

«*La energía del universo permanece constante en cualquier proceso.*»

La conservación de la energía que se observa a escala macroscópica (Termodinámica Clásica) es consecuencia de la aditividad de las energías de las partículas del sistema a escala microscópica (Termodinámica Estadística).

El principio de conservación de la energía como tal se estableció a mitad del siglo XIX gracias a los trabajos independientes de R. Mayer, J. P. Joule y H. Helmholtz. Éste último formalizó el principio en 1847. En Solbes y Tarín (2008) se recoge una revisión de las ideas científicas y las corrientes filosóficas que hicieron posible esta formulación.

Una consecuencia directa del primer principio es que si la energía no puede crearse ni destruirse en el universo, y toda variación de energía de un sistema se debe a los procesos de calor y trabajo que se realizan sobre él, entonces es imposible construir una máquina que sea capaz de producir trabajo sin consumir una cantidad al menos equivalente de energía, aun cuando no se produzca ningún intercambio de energía por calor. Por tanto, la inexistencia de la máquina conocida como "móvil perpetuo de primera especie" queda demostrada por el primer principio de la Termodinámica:

$$\Delta E \geq w$$

En Química, la mayor parte de los procesos tienen lugar en recipientes abiertos a la atmósfera, en condiciones de presión constante. Otros procesos se realizan en recipientes rígidos e incompresibles, con lo cual las condiciones son de volumen constante.

Si V = cte (proceso isocoro o isométrico) y el sistema es cerrado y solamente puede realizar un trabajo mecánico pV. Entonces $w = 0$, y la expresión del primer principio se transforma en:

$$q_V = \Delta U_{\text{isocoro}}$$

donde q_V es el calor intercambiado por un sistema cerrado en condiciones de V constante.

En el caso de un recipiente abierto a la atmósfera, con p = cte (proceso isobárico), el sistema puede experimentar transferencias de energía mediante los procesos de calor y trabajo de expansión. La suma de ambas contribuciones determina la variación de la energía del sistema: $\Delta U_{\text{isobárico}} = q_p + w$

Pero en Química interesa sobre todo analizar las transferencias de energía por calor. Para ello, despejamos q_p de la expresión anterior: $q_p = \Delta U_{\text{isobárico}} - w$

Como solamente consideramos el trabajo de expansión de los gases, introducimos su expresión reducida $w = -p \cdot \Delta V$ en la fórmula anterior:

$$q_p = \Delta U_{\text{isobárico}} + p \cdot \Delta V$$

Tanto la presión p del sistema como el volumen V son funciones de estado, por lo tanto el producto $p \cdot \Delta V$ lo es también; a la variable termodinámica que se origina, que es extensiva, se la designa por H o entalpía (éste es el nombre que le dio K. Onnes). En algunos libros figura también como *contenido calorífico* (p. ej., Price, 1998, p. 12).

El calor intercambiado por un sistema cerrado en condiciones de presión constante queda definido, pues, por la variación de la entalpía del sistema. Para un cálculo más riguroso deberían incluirse integrales en la expresión:

$$q_p = \Delta U_{\text{isobárico}} + p \cdot \Delta V = (U_{\text{final}} - U_{\text{inicial}}) + p \cdot (V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}) =$$

$$= (U_{\text{final}} + p \cdot V_{\text{final}}) - (U_{\text{inicial}} + p \cdot V_{\text{inicial}}) = H_{\text{final}} - H_{\text{inicial}} = \Delta H$$

La entalpía de un sistema cerrado se define como $H = U + p \cdot V$, y, por tanto, su unidad SI es el J (*ISO Standard Handbook*, vol. 2, 1992). La entalpía H es una propiedad extensiva del sistema, así que para convertirla en magnitud intensiva debe definirse como entalpía molar de una sustancia pura: $H_m = H/n = U_m + P \cdot V_n$.

La función de estado H es una de las más importantes en Termodinámica, porque permite calcular directamente el calor q_p intercambiado por un sistema cerrado sobre el cual sólo actúa un trabajo pV en un proceso a presión constante. Si se involucra trabajo eléctrico en una celda electroquímica reversible, la variación de entalpía no se ve alterada, pero el calor q_p intercambiado viene determinado por la variación de entropía del sistema: $q_p = T \cdot dS$ (Granville, 1985). La variación de entropía puede relacionarse además con el potencial de celda (Bindel, 2000).

Puesto que los estados de agregación condensados (los sólidos y los líquidos) sufren variaciones de volumen muy pequeñas durante las reacciones químicas que tienen lugar en condiciones de presión baja o moderada, el término $p \cdot \Delta V$ resulta despreciable frente a ΔU, y así:

$\Delta H \approx \Delta U$ para estados de agregación condensados.

Cuando la reacción química tiene lugar en disolución o cuando alguno de los reactivos o productos está disuelto, debe tenerse en cuenta que la variación de entalpía del proceso que involucra las sustancias en disolución depende de la concentración de la misma, y por tanto la variación de entalpía resultante es distinta de la del proceso en el cual las sustancias permanecen puras. Para hacer más cómodo el tratamiento algorítmico, se define el calor integral de disolución como la variación de entalpía relacionada con la disolución de un mol de soluto en una cantidad determinada de disolvente a temperatura y presión constantes. Las similitudes y diferencias entre un proceso de disolución y un proceso de reacción química son interesantes, pero no las trataremos aquí.

En ocasiones el tratamiento matemático se complica debido a efectos relacionados con la naturaleza de las disoluciones y, en muchos casos, con la concentración de las especies. Procesos como la hidratación de iones, la influencia de las fuerzas intermoleculares y la mezcla de sustancias producen desviaciones de los datos que serían esperables para una disolución ideal. En la p. 734 de la *Enciclopedia Salvat* (1964) se recoge un ejemplo de los efectos de la concentración, en este caso sobre la variación de entalpía de disolución acuosa del ácido sulfúrico: se produce una desviación de ~2 kcal entre los datos de calor integral de disolución correspondientes a la dilución infinita y a una concentración 5 molal de ácido sulfúrico en agua. La utilización de las unidades de molalidad para expresar la concentración de las especies no está muy extendida en las publicaciones científicas (se prefieren las unidades de fracción molar), pero puede facilitar

el análisis de los datos experimentales, especialmente si el sistema es una disolución de electrólitos (Canagaratna y Maheswaran, 2013).

No se debe confundir el calor de disolución con el calor de dilución, que es la cantidad de energía que se transfiere por calor cuando se agrega una cantidad adicional de disolvente a una disolución (por lo general, se define para un mol de soluto). En este sentido, el calor de disolución a dilución infinita se calcula extrapolando los resultados experimentales de la entalpía de disolución a dilución decreciente, en el límite en que la concentración de la disolución tiende a cero (Rodríguez Renuncio *et al.*, 2000, p. 126).

Resumiendo los aspectos energéticos de la disolución de una sal iónica cristalina:

Para disolver un cristal iónico se requiere aportar al sistema una cantidad inicial de energía para romper las interacciones electrostáticas de tipo ion-ion que existen entre los cationes y los aniones en la red cristalina. La energía térmica de las moléculas de agua basta para realizar este primer paso endotérmico (Ebenezer y Fraser, 2001); otro proceso endotérmico que tiene lugar es el debilitamiento de las interacciones intermoleculares (enlaces de hidrógeno) entre las moléculas de agua. La disolución también involucra un proceso exotérmico que es simultáneo a los dos anteriores: la hidratación o solvatación de los iones por parte del agua, puesto que ésta es un disolvente polar y crea interacciones electrostáticas ion-dipolo con los cationes y los aniones de la sal, que así se liberan de las interacciones iónicas de la red cristalina. Dependiendo de la estabilidad de las interacciones rotas y de las formadas durante el proceso de disolución, éste será exotérmico o endotérmico. Si asumimos que la disolución de la sal es exotérmica (es decir, que el balance global del proceso implica una liberación de energía al entorno) y que el calorímetro es adiabático, la energía liberada del proceso no puede salir del calorímetro y es absorbida por la disolución mediante un proceso de calor; esto implica un aumento de temperatura de la disolución, susceptible de medida. Si la disolución de la sal es un proceso endotérmico, la temperatura de la disolución disminuye a expensas de la energía térmica disponible.

En el laboratorio de Química y en los procesos químicos industriales, los sistemas sólidos o líquidos suelen encerrarse en recipiente abierto a la atmósfera o en recipiente cerrado y a presión cercana a la ambiente. En ambos casos, la presión del sistema es aproximadamente constante e igual a la presión atmosférica. Si se pretende realizar un proceso a presión constante sobre un sistema gaseoso, el gas se encierra en un cilindro provisto de un pistón móvil, para que la presión externa sobre el pistón se pueda mantener constante e igual a la presión inicial del gas; los cambios de temperatura a los que se somete el gas deben ser lentos y progresivos.

Si se varía la presión de un gas ideal para obligarlo a variar su volumen, se observa que el gas se comprime o expande sin variación de temperatura (experimento de Joule-Thomson). Entonces el coeficiente de Joule-Thomson μ del gas, que indica la variación de temperatura por unidad de cambio de presión en la expansión de un gas, es nulo. Pero los

gases reales tienden a variar su temperatura al expandirse y comprimirse, debido a las fuerzas intermoleculares, y su coeficiente de Joule-Thomson μ solamente es cero a un valor de temperatura concreto conocido como temperatura de inversión. A temperaturas menores que la de inversión, la expansión del gas va acompañada de una disminución de temperatura, y viceversa, la compresión del gas implica un aumento en la temperatura. A temperaturas más elevadas que la de inversión se observa el comportamiento inverso. La mayoría de los gases tienen su temperatura de inversión superior a la ambiente, por lo que *se enfrían* cuando se expanden y *se calientan* al contraerse, y esta tendencia hace posible diversos métodos criogénicos: por ejemplo, se utiliza aire comprimido al que se deja expandir para refrigerar otra porción de aire comprimido que posteriormente se dejará expandir… Además, este comportamiento de los gases permite licuar muchos de ellos, salvo el helio y el hidrógeno gaseosos, que a temperatura ambiente son excepciones a esta tendencia general de comportamiento, porque las temperaturas de inversión del hidrógeno y del helio son muy inferiores a la temperatura ambiente. Por este motivo, al expandirse aumentan su temperatura y al comprimirse disminuyen su temperatura, y para llegar a licuar estos gases primero hay que enfriarlos por debajo de su temperatura de inversión; para ello se necesitan instalaciones refrigeradoras especiales.

También puede definirse una presión de inversión (Rodríguez Renuncio *et al.*, 2000, p. 69).

Si en un sistema cerrado formado por una sustancia pura que sólo realiza trabajo $p \cdot V$, se lleva a cabo un proceso reversible de cambio de estado de agregación a temperatura y presión constantes, el calor involucrado en el proceso se denomina calor latente, q_L, porque toda la energía que se aporta o retira del sistema se invierte en cambiar el estado de agregación sin que el sistema experimente variación de temperatura. Así pues, durante el cambio de estado las partículas del sistema no varían de energía cinética promedio, pero vencen o refuerzan sus interacciones atractivas, lo que exige un trabajo en contra de las interacciones que eran estables antes del cambio. La cantidad de energía transferida por calor puede medirse experimentalmente, y si el proceso sucede en condiciones de presión constante, $q_L = \Delta H = m \cdot L$, siendo m la masa del sistema y L el calor latente, que es una constante característica de la sustancia y del cambio de estado. L se mide en cal/g o en J/kg.

La capacidad calorífica C de un sistema cerrado en un proceso infinitesimal mide la cantidad de energía que se debe añadir a una sustancia para producir un aumento dado de su temperatura. Para asegurarse de que la variación de temperatura está definida, debe trabajarse con intervalos ∂T infinitesimales, con lo cual el proceso sucede en condiciones de práctica reversibilidad. Así pues, la capacidad calorífica se define como:

$$C = \partial q / \partial T$$

donde ∂q y ∂T son, respectivamente, el calor transferido al sistema y la variación de temperatura que éste experimenta durante el proceso. Cada sustancia química tiene un

valor concreto de capacidad calorífica, que depende directamente de su estructura atómico-molecular: cuantas más posibilidades tenga la sustancia de absorber energía por traslación, rotación o vibración de sus partículas o por la intensidad y la distribución de las fuerzas intermoleculares, mayor será su capacidad calorífica, porque para aumentar la temperatura en una cantidad dada, el aporte de energía por calor deberá ser más elevado.

La expresión *capacidad calorífica* resulta poco apropiada porque parece sugerir que los cuerpos contienen calor, y esta idea se halla en desacuerdo con la definición de calor aceptada por la comunidad científica; de hecho, es una reminiscencia de la teoría del calórico, en el sentido de que indica la "capacidad de almacenaje de calórico en el cuerpo". No obstante, algunos manuales y libros de texto sobre Termodinámica y los *handbooks* de Ciencias (por ejemplo, el *ISO Standard Handbook*, vol. 2, 1992 o el *Handbook of Chemistry and Physics*, 1999-2000) continúan utilizando esta terminología.

Por definirse en relación con el calor, la capacidad calorífica C depende de la naturaleza del proceso. Para un sistema cerrado en el que sólo se puede realizar trabajo pV, si el proceso tiene lugar a presión constante, parte de la energía absorbida por calor se invierte en trabajo de expansión; sin embargo, si el proceso tiene lugar a volumen constante, el sistema no realiza trabajo sobre el entorno y toda transferencia energética se produce solamente por calor.

Por tanto, en los procesos a presión constante se define la capacidad calorífica C_p (capacidad calorífica isobárica) de un sistema cerrado:

$$C_p = \partial q_p / \partial T$$

Análogamente, la capacidad calorífica a volumen constante (o capacidad calorífica isocora) C_V de un sistema cerrado es $C_V = \partial q_V / \partial T$.

Para un proceso infinitesimal, las expresiones de C_p y C_V de un sistema cerrado en equilibrio muestran la dependencia de H y U, respectivamente, con T:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \quad \text{y} \quad C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$$

Si un sistema es homogéneo y se encuentra en equilibrio, en reposo y en ausencia de campos, su estado queda especificado mediante la composición del sistema y dos cualesquiera de las variables termodinámicas, como T y p, ó p y V (Price, 1998, p. 2). Aunque el número mínimo de variables independientes que se debe especificar para definir un estado termodinámico depende de las condiciones y de la complejidad del sistema, como mínimo hay que fijar dos variables independientes; en general, con los valores de dos variables intensivas de una fase, normalmente quedan establecidas las restantes, aunque este criterio no es válido para sistemas coloidales, con propiedades magnéticas, etc. En rigor, la Termodinámica no detalla exactamente el número mínimo de variables de estado cuyos valores permiten conocer cualquiera de las demás; éste es un dato empírico. Si el estado del sistema objeto de estudio es un estado de no-equilibrio, el

número de variables necesario para describirlo depende de la precisión que se pretenda alcanzar, y en general se necesitan mediciones experimentales de valores locales (Kaper y Goedhart, 2002).

Queda claro que la capacidad calorífica C es una propiedad extensiva del sistema, y para definirla como intensiva se trabaja con la capacidad calorífica molar $C_m = C/n$, para una sustancia pura. La unidad del SI para C es el J/K; pero la mayoría de los datos de capacidades caloríficas se encuentran tabulados en cal/K.

Para determinar de manera experimental el valor de la capacidad calorífica de una sustancia a presión constante, ésta se mantiene en un recipiente cerrado adiabáticamente que incluye un serpentín eléctrico. El valor de C_p se obtiene a partir del aumento de la temperatura que se produce al calentar eléctricamente la muestra. Si el sistema tiene una composición química sencilla, se pueden obtener los valores de las capacidades caloríficas C_p y C_V mediante cálculos teóricos basados en la mecánica estadística.

La expresión que hemos enunciado para la capacidad calorífica debe adoptar otra forma matemática en aquellos procesos en los cuales las variaciones de temperatura no son suficientemente pequeñas como para considerarlas infinitesimales. En un intervalo ∂T pequeño, el valor de C para una sustancia pura puede aproximarse a una constante; sin embargo, si el intervalo de temperaturas ΔT es grande, la capacidad calorífica es función de la temperatura y casi siempre la dependencia es polinómica. Al integrar la función C entre los límites considerados de temperatura T_1 y T_2, se puede determinar la dependencia de la entalpía H con T; esta integral constituye la expresión matemática de la Ley de Kirchhoff (de 1958).

C_p y C_V son función de p y T, respectivamente. A partir de los principios de la Termodinámica se puede probar que son necesariamente positivas y que el término matemático de diferencia entre ambas se corresponde, para un gas ideal, con la constante R de los gases ideales (relación de Mayer): $C_{p,m} - C_{V,m} = R$ (Levine, 2002, p. 59). El calor específico a presión constante es menor que el calor específico a volumen constante porque en la expansión térmica adiabática de un gas hay una parte de la energía que se transfiere mediante trabajo de expansión. Utilizando esta ecuación, Mayer calculó en 1840 el equivalente mecánico del calor. Tres años después, Joule lo mediría por diferentes métodos eléctricos y mecánicos, y obtendría unos resultados similares.

Para gases no ideales, al término R de la relación de Mayer se suma otro que se corresponde con la presión interna debida a las interacciones entre partículas, las cuales influyen en los modos de excitación (Callen, 1981, p. 323). Para los sólidos y los líquidos, de ínfima compresibilidad y dilatabilidad, la diferencia entre ambas capacidades caloríficas se considera despreciable, y suele trabajarse con un único valor de capacidad calorífica independientemente de si las condiciones son isobáricas o isocoras.

En 1819, Dulong y Petit observaron que los calores específicos de los líquidos o los sólidos son diferentes a temperatura ambiente salvo que se midan en términos de *calor*

atómico (enunciado de Dulong-Petit). Pero a lo largo del siglo XIX se descubrieron numerosas excepciones de sustancias que no verificaban lo predicho por este enunciado, como los casos del diamante, el silicio o el germanio sólidos a temperatura ambiente, así como algunos sólidos sometidos a temperaturas inferiores a 77 K, que es la temperatura "ambiente" del nitrógeno líquido. En 1907, Einstein utilizó la hipótesis cuántica para explicar estas desviaciones, e introdujo una nueva fórmula para el calor específico atómico c_V, del cual predijo que debía caer a cero a temperaturas diez veces menores que un valor concreto al que denominó temperatura característica de Einstein, y que está definido por la ecuación de un cuanto en la energía clásica de un oscilador. La ecuación de Einstein falla a temperaturas extremadamente bajas (sobre los 16 K a los que trabajaron Nernst y colaboradores); pero parece que c_V se aproxima a cero cuando la temperatura tiende al cero absoluto, de acuerdo con las deducciones de Nernst.

Para cualquier sistema unifásico de composición conocida y de masa m, se define la capacidad calorífica específica a presión constante como $c_p = C_p/m$ (*ISO Standard Handbook*, vol. 2, 1992). Habitualmente se la denomina calor específico, y es una propiedad intensiva del sistema, característica de cada sustancia química, que condiciona la temperatura alcanzada frente a un determinado aporte de energía para una masa dada de sustancia. Su unidad SI es el J/kg·K, aunque muchas tablas de datos utilizan las unidades de cal/g°C. No debe confundirse la capacidad calorífica específica (o calor específico c) con la capacidad calorífica molar C_m, aunque ambas son intensivas.

Cuando dos cuerpos a diferente temperatura se ponen en contacto, alcanzan el equilibrio térmico a una temperatura intermedia. Si ambos cuerpos, de masas m_1 (y temperatura T_1) y m_2 (de temperatura T_2), están aislados y no se produce en ellos ningún cambio de estado de agregación o de fase ni ninguna reacción química, se verifica experimentalmente que, para cualquier valor de T_1, T_2 y de la temperatura final T_f, la cantidad de energía por calor que cede el cuerpo de mayor temperatura inicial es ganada por el cuerpo de menor temperatura inicial. Por ello:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (T_f - T_1) = -m_2 \cdot c_2 \cdot (T_f - T_2)$$

siendo c_1 y c_2 los calores específicos (capacidades caloríficas específicas) de los cuerpos de masa m_1 y m_2, respectivamente. Por definición, el calor específico del agua es $c_{H_2O} = \mathbf{1{,}00\ cal/g \cdot {}^\circ C}$ a T = 15 °C y p = 1 atm.

Esta ecuación surge de la definición del calor transferido: $\partial q = C \cdot \partial T$. Recordemos que la capacidad calorífica depende de la temperatura y la presión. Considerando que la presión es constante, $\partial q_p = C_p \cdot \partial T$, y se integra la expresión entre las T consideradas:

$$q_p \text{ (cedido)} = q_p \text{ (absorbido); luego } \int_{T_1}^{T_f} C(T) \cdot dT = -\int_{T_2}^{T_f} C(T) \cdot dT$$

Si el intervalo de temperaturas es pequeño, la variación de la capacidad calorífica C_p (esto es, de $m \cdot c_p$) con la temperatura será despreciable, y se verifica que $m_1 \cdot c_1 \cdot \Delta T_1 = -m_2 \cdot c_2 \cdot \Delta T_2$, siendo $\Delta T_1 = (T_f - T_1)$, y $\Delta T_2 = (T_f - T_2)$.

El calor específico puede medirse en condiciones de presión constante (c_p) o de volumen constante (c_V). El cociente entre c_p y c_V se denomina coeficiente de dilatación adiabática γ.

Cuando se realiza una reacción química, la temperatura final del recipiente suele ser diferente a la temperatura inicial. Esta diferencia de temperaturas indica que ha tenido lugar una transferencia neta de energía por calor entre el sistema y el entorno. Por lo general, el calor puesto en juego en una reacción química no está definido, porque depende del camino termodinámico. Pero si la reacción sucede a presión o a volumen constante, la cantidad total de energía absorbida o liberada por calor sí está definida, y coincide con la variación de energía interna ΔU en los procesos isocoros, y con la variación de la entalpía ΔH en los procesos isobáricos; la mayoría de las reacciones químicas son isobáricas. Por ser la entalpía una función de estado, no importa que la temperatura o la presión varíen de manera transitoria durante el proceso de reacción. Siempre que el estado inicial (reactivos) y el estado final (productos) estén en las mismas condiciones, se considera que la reacción ha sucedido en condiciones de T y p constantes.

En Termoquímica se define el calor de reacción como la cantidad de energía transferida por calor al sistema durante la transformación completa de los reactivos a productos en condiciones en las que la presión y la temperatura de éstos y aquéllos no varían. Si la reacción no se completa o bien la presión y/o la temperatura experimentan cambios apreciables entre el estado inicial y el final, se deben introducir correcciones.

Las reacciones se consideran exotérmicas o endotérmicas dependiendo del sentido de las transferencias netas de energía por calor:

Es exotérmica toda reacción que verifica una transferencia neta de energía por calor desde el sistema a los alrededores. Según el convenio de signos habitual, el calor de una reacción exotérmica será negativo, puesto que el sistema cede energía por calor. Para una reacción exotérmica, isotérmica e isobárica, $\Delta H < 0$.

Es endotérmica toda reacción verifica una transferencia neta de energía por calor desde el entorno al sistema. El calor es positivo, y por tanto $\Delta H > 0$ si la reacción es isotérmica e isobárica.

Si una reacción exotérmica es adiabática y se produce a presión constante, entonces $q = 0$ y $\Delta H = 0$. Dado que en condiciones adiabáticas el sistema no puede transferir energía por calor, su temperatura necesariamente aumenta ($\Delta T > 0$), y los productos estarán a una temperatura más elevada de la que tenían los reactivos en el estado inicial. Obsérvese que, en este caso, la reacción es exotérmica, pero la variación de entalpía es nula porque en condiciones adiabáticas no se permite que el sistema transfiera energía por calor al entorno. En rigor, las condiciones adiabáticas de reacción son una idealización, pero en algunas ocasiones las reacciones químicas transcurren de manera prácticamente adiabática, ya sea porque el sistema reaccionante se encuentra bien aislado térmicamente, o porque la reacción es tan rápida que en la práctica no hay apenas tiempo

para que se transfiera por calor la energía neta liberada como consecuencia de la reacción. En estos casos, el calor de reacción se invierte únicamente en aumentar o disminuir la temperatura del sistema sin que el entorno verifique cambios térmicos. A la temperatura que alcanzan los productos de la reacción se la conoce con el nombre de temperatura de llama adiabática o temperatura máxima de llama, y es especialmente interesante en la combustión de hidrocarburos gaseosos o del gas hidrógeno. Las temperaturas de llama suelen tener valores del orden de miles de grados Celsius, en especial si se utiliza oxígeno puro como comburente; en el aire, la temperatura de llama se reduce notablemente (Rodríguez Renuncio *et al.*, 2000, p. 129-130).

El valor de la temperatura de llama se puede determinar de manera experimental o estimar por procedimientos teóricos, aunque los cálculos arrojan un resultado algo superior al valor que se obtiene por medición. Entre las varias razones que existen para la discrepancia entre la temperatura de llama teórica y la experimental, citaremos dos: en primer lugar, las reacciones no son estrictamente adiabáticas, siempre hay unas mínimas pérdidas de energía que no se llegan a detectar; en segundo lugar, a temperaturas altas pueden producirse algunas disociaciones moleculares de las especies químicas, con el consiguiente *consumo* de energía en algunos procesos que no contribuyen al rendimiento final de la reacción que se pretende estudiar. Además, en las condiciones de altas temperaturas en las cuales se trabaja, la mayor parte de las reacciones suceden a gran velocidad y la energía puede no transferirse con tanta celeridad; la acumulación de energía en la mezcla de combustión puede llegar a generar una explosión. La temperatura del proceso puede calcularse de forma teórica considerando que la explosión es tan rápida que el volumen del sistema permanece constante incluso si se trabaja en recipiente abierto, lo cual no es recomendable. La presión que alcanza el sistema como consecuencia del proceso explosivo se puede estimar suponiendo que los gases emitidos siguen un comportamiento ideal.

Si toda reacción química isobárica y no adiabática conlleva una transferencia neta de energía por calor con el entorno, y por tanto se le asocia una variación de entalpía no nula, ésta se puede medir utilizando técnicas calorimétricas. Lo ideal sería que los datos de ΔH obtenidos, que responden a unas determinadas condiciones de presión y temperatura y a una determinada cantidad de sustancia, pudieran utilizarse para elaborar una escala absoluta de entalpías que atribuyera un valor de H a la cantidad referencial de 1 mol de sustancia química pura. Tales valores de H serían propiedades termodinámicas individuales de cada sustancia en un determinado estado termodinámico que está representado por unos valores de T y p concretos. Sin embargo, el marco teórico de la Termodinámica no permite medir los valores absolutos de las magnitudes principales U, H, S, G, sino solamente sus variaciones ΔU, ΔH, ΔS, ΔG… que expresan la relación entre dos estados de equilibrio: el inicial y el final.

Fuera del marco termodinámico sí es posible asignar un valor absoluto a las variables principales de cualquier sustancia utilizando los postulados de la relatividad

especial de Einstein. Pero estos cálculos resultan inútiles en la Termodinámica Química, porque los efectos relativistas (variación de masa, etc.) que acompañan a un proceso químico son demasiado pequeños para detectarlos. Sin embargo, en Física puede interesar la perspectiva relativista para resolver problemas relacionados con procesos termodinámicos que implican una variación de energía mecánica del sistema. La aplicación de los postulados y formalismos de la teoría especial de la relatividad a la Termodinámica Clásica configura el marco de la Termodinámica Relativista (Güémez, 2010), cuyo objetivo principal es analizar el comportamiento de cuerpos compuestos, extensos y deformables mediante el formalismo de cuadrivectores de Minkowski. En este trabajo de investigación, centrado en la Termoquímica y la Termodinámica Química, no trataremos los objetivos y métodos de la Termodinámica Relativista.

Resumiendo, carece de sentido práctico el tabular las entalpías absolutas de formación de las sustancias, pero sí resulta útil disponer de algunas variaciones de entalpías de formación $\Delta H_{molar,temperatura}$**[f(X)]** relevantes, donde la reacción de formación de la sustancia X es aquella reacción teórica que tiene como reactivos todos y cada uno de los elementos químicos constituyentes de X, en las proporciones estequiométricas correspondientes para generar como producto un mol de X.

Los datos resultan más útiles a los investigadores si se tabulan para estados termodinámicos a presión normal (que aquí denominaremos p_{normal} = 1 bar ≡ 100 000 Pa) o estándar (según la antigua convención $p_{\text{estándar}}$ = 1 atm), y a una temperatura de interés. Hasta 1982, la presión de referencia era la de 1 atm, y de hecho las tablas elaboradas antes de esta fecha tomaban la presión estándar como referencia. Desde 1982, la IUPAC recomienda utilizar como referencia la presión normal (p_{normal} = 1 bar), más compatible con el sistema internacional de unidades y ligeramente inferior a una atmósfera ($p_{\text{estándar}}$ = 1 atm = 1,01325 bar). Los términos normal y estándar suelen utilizarse indistintamente incluso en *Handbooks* modernos como *Quantities, units, and symbol in Physical Chemistry* (1993) o el *Handbook of Chemistry and Physics* (1999-2000); por su parte, en Levine (2002, p. 1) recomiendan, frente al anglicismo *estándar*, el término normal en su acepción de "lo que por su naturaleza, forma o magnitud se ajusta a ciertas normas fijadas de antemano". Si se trabaja con sólidos y líquidos, las propiedades termodinámicas de las sustancias varían muy poco con la presión, y la diferencia entre 1 atm y 1 bar prácticamente no afecta a los datos tabulados.

Para definir el estado normal de una sustancia química no es necesario fijar un valor de la temperatura (Frederickson, 1983). No obstante, la temperatura absoluta que suele venir especificada en las tablas de datos termodinámicos es la de 298 K (~25 ºC); se trata de un valor convenido por tradición, al considerarse que ésta es la temperatura de trabajo en el laboratorio. En estas condiciones existe suficiente información experimental como para obtener datos de casi todas las sustancias químicas imaginables. Sin embargo, dado que la adopción de uno u otro valor de temperatura no es condición necesaria para

definir el estado estándar, se tiende a no utilizar símbolo alguno para *T* cuando se especifica el estado normal de las sustancias.

El estado normal de un líquido o sólido puro en equilibrio experimentalmente reproducible se define como el estado más estable a la presión de 1 bar y a la temperatura de interés; así pues, a cada valor de *T* le corresponde un único estado normal. En el caso de los sólidos que existen en más de una forma alotrópica a presión estándar se considera que el estado normal corresponde a la forma alotrópica más estable a la presión de 1 bar. Así, por ejemplo, a 298 K y 1 bar, el azufre rómbico es más estable que el azufre monoclínico, y el grafito es más estable que el diamante; por lo tanto, el estado normal del azufre a 298 K es el azufre rómbico, y el estado normal del carbono es el grafito.

Para un gas puro, el estado normal a temperatura *T* se define como aquél en el que se cumplen simultáneamente dos condiciones: la presión es de 1 bar, y el gas se comporta idealmente. El estado normal de un gas es, por lo tanto, un estado ficticio que se toma como referencia porque resulta una aproximación razonable en un rango de presiones cercanas a la ambiente y en un intervalo de temperaturas suficientemente amplio. No obstante, si se pretenden realizar cálculos más rigurosos, debe tenerse en cuenta que los valores de las variables termodinámicas no dependen solamente de las fuerzas intramoleculares sino también de las intermoleculares, y por este motivo se debe determinar la diferencia entre la entalpía del estado normal (que es ideal) y la entalpía del gas real.

En la práctica sólo existe una excepción a la regla de que la forma de referencia de una sustancia es la forma más estable a la presión de 1 bar y a la temperatura de interés: para los elementos que son gaseosos a 1 bar y 298 K, la mayoría de las tablas de datos termodinámicos utilizan como estado de referencia el del gas a $T < 298$ K incluso si a dicho valor de *T* la forma más estable de la sustancia fuera un líquido o un sólido.

La variación de entalpía molar normal de una reacción química, $\Delta H^0_{m,T}$ o *calor de reacción normal* se define como la variación de entalpía implicada en la transformación de los números estequiométricos de los reactivos puros, separados y en sus estados normales a una temperatura *T*, en los números estequiométricos de los productos puros y separados, cada uno de ellos en su estado normal a la temperatura *T*. Es decir: $\Delta H^0_{m,T} = \sum_i \nu_i \cdot \Delta H^0_{m,T}$, siendo ν_i el número estequiométrico correspondiente a la sustancia *i*. Dado que los coeficientes estequiométricos son adimensionales, las unidades de la variación de entalpía siguen siendo las recomendadas por la IUPAC.

La magnitud $\Delta U^0_{m,T}$ se define de manera similar: es la variación de energía interna molar implicada en la transformación de los números estequiométricos de los reactivos puros, separados y en sus estados normales a una temperatura *T*, en los números estequiométricos de los productos puros y separados, cada uno de ellos en su estado normal a la misma temperatura *T*. Es decir, $U^0_{m,T} = \sum_i \nu_i \cdot \Delta U^0_{m,T}$.

En una reacción química simbolizada por la ecuación aA + bB → cC + dD, la variación de entalpía normal ΔH_T^0 viene dada por el balance de las variaciones de entalpía:

$$\Delta H_T^0 = \left\{\mathbf{c}\cdot\Delta H_{m,T}^0\mathbf{[f(C)]} + \mathbf{d}\cdot\Delta H_{m,T}^0\mathbf{[f(D)]}\right\} - \left\{\mathbf{a}\cdot\Delta H_{m,T}^0\mathbf{[f(A)]} + \mathbf{b}\cdot\Delta H_{m,T}^0\mathbf{[f(B)]}\right\}$$

donde $\Delta H_{m,T}^0\mathbf{[f(X)]}$, con X = A, B, C, D, es la variación de entalpía molar de la sustancia X en su estado normal a la temperatura *T*. El superíndice ^{0} indica que las variaciones de entalpía están referidas a la presión normal 1 bar. El subíndice *T* en la expresión $\Delta H_{m,T}^0\mathbf{[f(X)]}$ suele omitirse desde el momento en que se declara cuál es el valor de la temperatura de trabajo. La mayoría de las tablas termoquímicas recogen variaciones de entalpía estándar o normal de formación para *T* = 298 K, y las unidades habituales de $\Delta H_{m,T}^0\mathbf{(X)}$ son el J/mol o la cal/mol. En general, las primeras tablas utilizaban la caloría termoquímica (1 cal ≡ 4,184 J) como unidad de energía, aunque también existe la caloría ingenieril, empleada por ingenieros y físicos y definida como 1 cal ≡ 4,1868 J. La caloría termoquímica se define como la cantidad de energía que se ha de transferir por calor para elevar la temperatura de 1 g de agua pura, a la presión de 1 atm, desde los 14,5 ^{o}C hasta los 15,5 ^{o}C. Desde la Conferencia de la Tabla Internacional del Vapor, celebrada en Londres en 1929, la caloría equivale a 1/860 Watt-hora (Enciclopedia Salvat, 1964). Las tablas modernas recogen los valores de energía en la unidad del SI: el Julio (*Joule*).

Así pues, se define la variación de entalpía normal de formación de una sustancia pura X a la temperatura *T*, $\Delta H_{m,T}^0\mathbf{[f(X)]}$, como la variación de entalpía normal correspondiente al proceso químico en el que se forma un mol de la sustancia X en su estado normal (el más estable a 1 bar de presión) a la temperatura *T* a partir de sus elementos separados, encontrándose cada uno de ellos en sus formas normales a la temperatura *T*. En algunas ocasiones, en lugar de 1 mol se toma como referencia 1 g de masa de la sustancia (*Handbook of Chemistry and Physics*, 1999-2000). Por economía de lenguaje, a las variaciones de entalpía de formación suele denominárselas simplemente *entalpías de formación*, aunque esta denominación no es adecuada.

Ya hemos indicado que no es posible conocer valores absolutos de entalpía para las sustancias químicas; pero sí se puede elaborar una escala convencional o relativa de entalpías del estado normal de las sustancias a una temperatura fija, y a partir de estos datos tabulados se llega a calcular la variación de entalpía normal de cualquier reacción. Para construir la tabla de entalpías relativas se eligen suficientes sustancias de referencia en un estado termodinámico concreto y se les asigna un valor arbitrario de entalpía. Las sustancias de referencia más convenientes son los elementos puros, y el estado termodinámico elegido es el estado normal de la forma más estable del elemento a 1 bar de presión y 298 K de temperatura. La convención que se ha adoptado establece que la entalpía normal de formación de cualquier elemento en su estado normal a temperatura ambiente (298 K) es cero. Es decir: $\Delta H_{m,298\ K}^0\mathbf{[f(elemento)] = 0}$.

Aunque en rigor las entalpías absolutas de los distintos elementos químicos tienen valores diferentes, la convención $\Delta H_{m,298\ K}^0\mathbf{[f(elemento)] = 0}$ es admisible, porque en las

reacciones químicas los elementos no se transmutan, y el número de átomos de todos y cada uno de los elementos permanece constante.

La principal ventaja de asignar arbitrariamente el valor cero de entalpía a los elementos químicos en estado normal es que partiendo de esta asignación se puede obtener el valor (relativo) de entalpía de cualquier sustancia, así como la asociada a cualquier reacción, siempre que los estados termodinámicos de productos y reactivos sean reproducibles experimentalmente. Utilizando una batería de datos experimentales tabulados y los algoritmos de las ecuaciones termoquímicas se puede determinar con una precisión aceptable la variación de entalpía normal de cualquier proceso químico.

Para determinar la variación de entalpía de formación y las capacidades caloríficas de algunos compuestos se suele recurrir a los métodos calorimétricos. Pero estas determinaciones experimentales requieren que la reacción sea lo suficientemente rápida como para que el intercambio de energía por calor entre el calorímetro y los alrededores pueda despreciarse. Además, es preferible que la reacción sea completa, para no tener que determinar la cantidad de materia que ha reaccionado. La reacción debe ser además limpia, sin procesos secundarios.

Hasta ahora hemos detallado el método que se sigue para calcular la variación de entalpía de cualquier reacción química que tenga lugar a temperatura ambiente, pero los valores de las entalpías de las sustancias químicas dependen de la temperatura y, en general, tienden a aumentar con ella, aunque la dependencia suele ser pequeña, porque la variación en los productos tiende a anular la de los reactivos. Así, si no hay especies que sufran un cambio de estado en el intervalo de temperaturas considerado, entonces la dependencia de ΔH con respecto a T puede incluso despreciarse. En aquellos casos en los que no se pueda obviar, esta dependencia se determina integrando la función C entre los límites considerados de temperatura T_1 y T_2 (Ley de Kirchhoff), dado que la entalpía es una función de estado y por tanto no depende del camino seguido:

$$\Delta H^0_{T_2} - \Delta H^0_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} \Delta C^0_p \cdot \Delta T$$

donde ΔC^0_p se define como la variación de la capacidad calorífica normal de la reacción, suma de las capacidades caloríficas molares de las sustancias implicadas en la reacción en su estado normal a la temperatura de interés. Nótese que la derivación no es parcial porque se ha fijado la presión en su valor normal.

Si el intervalo de temperaturas es pequeño, ΔC^0_p apenas varía, y la expresión de la ley de Kirchhoff puede aproximarse como:

$$\Delta H^0_{T_2} = \Delta H^0_{T_1} + \Delta C^0_p \cdot \Delta T$$

Si en el intervalo de temperatura ΔT ocurren cambios de estado, cada variación debe analizarse por separado. Casi siempre la influencia térmica viene expresada en una función polinómica de T cuyos coeficientes no tienen significado teórico y se determinan

mediante un ajuste de mínimos cuadrados de los datos experimentales de ΔC_p^0 en el intervalo de temperaturas considerado. Se han publicado tablas que contienen los datos de los coeficientes de dichas funciones polinómicas para numerosas sustancias en el intervalo de temperaturas entre los 300 K y los 1 500 K.

Los diagramas entálpicos son representaciones gráficas bidimensionales en las que se describen los valores que tiene la entalpía en los estados inicial y final. En ellos no se representa la función entalpía frente a magnitudes físicas como el tiempo o el avance de la reacción; el eje horizontal no recoge ninguna variable de estado y solamente se utiliza para simbolizar los estados inicial y final del sistema. Resumiendo: en el eje vertical (ordenadas) se representa el valor de entalpía, y en el horizontal se señalan a una distancia arbitraria las composiciones químicas correspondientes a los estados inicial y final del sistema. Si mediante el diagrama entálpico se pretende comparar los balances energéticos netos de varias reacciones químicas diferentes (por ejemplo, porque éstas se realizarán de manera sucesiva sobre la misma mezcla reaccionante, o porque alguna de las composiciones químicas representada corresponde a un estado inicial o final de más de una reacción), entonces pueden superponerse en el mismo diagrama todas las representaciones, a voluntad del investigador.

En los diagramas entálpicos puede declararse la asignación arbitraria del valor cero a la entalpía del estado inicial del sistema, en cuyo caso el signo de la entalpía final indicará el sentido del balance energético neto del proceso. También puede recurrirse a la asignación internacional del valor cero de entalpía para el estado normal de los elementos químicos; como valor de temperatura suele utilizarse 298 K.

- Leyes de la Termoquímica. Calorimetría

La calorimetría es la técnica experimental de medida del calor involucrado en los procesos termodinámicos que tienen lugar en condiciones controladas, y tiene su origen en los experimentos de A. L. Lavoisier, P. S. Laplace y J. P. Joule.

La cantidad de energía absorbida o desprendida por un proceso de calor durante una reacción química se transfiere tanto a las sustancias que intervienen en la reacción como a los recipientes que las contienen; el sistema químico y el recipiente experimentan una variación medible en su temperatura, ΔT, que permite conocer el calor involucrado, que, dependiendo de las condiciones del proceso, coincide con la variación de la energía interna o de entalpía del sistema.

Para determinar el calor de formación de un compuesto químico no basta con que la reacción de formación del mismo sea químicamente posible en unas condiciones de presión y temperatura reproducibles de manera experimental. La reacción también debe ser adecuada para el experimento de calorimetría: rápida, completa y sin reacciones secundarias, puesto que de lo contrario se introducen incertidumbres difíciles de cuantificar. Las reacciones que mejor se adaptan a estas exigencias y producen mejores resultados experimentales son las combustiones. En la década de los 60, por ejemplo, se

habían alcanzado incertidumbres inferiores al 0,1% (y en algunos casos, al 0,02%) en la determinación calorimétrica de calores de combustión de compuestos orgánicos (ver p. 732, *Enciclopedia Salvat*, 1964).

A causa de las características químicas de las sustancias y de las exigencias que impone la determinación calorimétrica, solamente se pueden conocer las variaciones de entalpía de formación de ciertos tipos de compuestos, para los que pueden medirse además las capacidades caloríficas. Las reacciones que implican alguna especie en estado gaseoso se estudian en calorímetros a volumen constante, mientras que las reacciones en las que no intervienen gases se estudian en calorímetros a presión constante.

El equipo experimental para la determinación del calor de combustión es la bomba calorimétrica, que consiste en un recipiente de acero en cuyo interior se encierra la muestra en una atmósfera de oxígeno a presión. Un dispositivo eléctrico provoca la ignición, y un termómetro mide la elevación de la temperatura del baño donde está sumergido el recipiente. A partir del aumento de la temperatura, se calcula el calor de reacción a volumen constante y, con éste, queda determinada la variación de entalpía del sistema. La calibración del calorímetro se realiza midiendo la elevación de temperatura que se produce en la combustión de una muestra patrón de ácido benzoico purísimo.

Para aquellas reacciones en las que no concurren gases, las determinaciones calorimétricas suelen realizarse en el interior de un calorímetro similar a un vaso termo o Dewar, que puede utilizar un líquido en la envoltura o baño para uniformizar la temperatura del instrumento (suelen emplearse agua o etilenglicol); si no se utiliza un líquido, la uniformización de la temperatura se puede lograr mediante una carcasa de metal de alta conductividad térmica (calorímetros de tipo aneDaríode). En todo caso, el calorímetro no ha de estar provisto de cierre hermético, porque se pretende mantener la presión del sistema igual a la atmosférica. Sí se debe disponer de un sistema termométrico con el que medir la variación de temperatura que se produce durante la reacción. Por supuesto, antes de introducir los reactivos hay que asegurarse de que éstos alcanzan la temperatura que se considerará inicial para el sistema. Los calorímetros están diseñados de tal manera que sus paredes internas apenas absorben o ceden energía, simulando una pared adiabática. Sin embargo, como es imposible construir una pared totalmente adiabática, los fabricantes de calorímetros testan y marcan para cada recipiente cuál es el valor de su equivalente en agua, esto es, cuál es la masa de agua térmicamente equivalente a la masa del calorímetro. Con el equivalente en agua se puede estimar la capacidad calorífica del calorímetro, que permite calcular la cantidad de energía absorbida por las paredes del instrumento. Esta cantidad debe tenerse en cuenta para determinar cuánta energía se transfiere realmente durante el proceso objeto de estudio.

La Termoquímica se basa en dos leyes empíricas que son una aplicación directa del primer principio de la Termodinámica, aunque tradicionalmente se enuncian separadas de éste porque fueron enunciadas con anterioridad a él.

La primera de las Leyes de la Termoquímica, debida a A. L. Lavoisier y P. S. Laplace, establece que «*la cantidad de energía por calor que se ha de suministrar a un compuesto para descomponerlo en sus elementos a presión o volumen constante, es igual a la cantidad de energía que se libera por calor cuando se sintetiza el compuesto a partir de sus elementos*.» De no ser así, sería posible obtener energía mediante síntesis y descomposiciones sucesivas de una sustancia química. En realidad, la validez de esta ley empírica no se reduce a los procesos de síntesis, sino que puede aplicarse a cualquier reacción química. Una expresión más general de esta ley podría enunciarse como sigue: «*a presión o volumen constante, el cambio térmico que acompaña a una reacción química en una dirección dada es igual y de sentido contrario al cambio térmico asociado al proceso químico inverso*.»

Lavoisier y Laplace consideraban que el calor asociado a una reacción química está en relación directa con las fuerzas de afinidad de los reactivos.

La segunda ley de la Termoquímica es la establecida por H. Hess, y lleva su nombre. Se enuncia de la siguiente manera:

«*En condiciones de presión o de volumen constante, el calor asociado a una reacción química dada es el mismo tanto si ésta se verifica en una sola etapa como si tiene lugar en varias; en consecuencia, la variación de entalpía global de la reacción es la suma de las variaciones de entalpía correspondientes a las etapas*.» Esta ley empírica deriva de las propiedades de las funciones de estado energía interna y entalpía, que dependen únicamente de los estados inicial y final del sistema y no del camino seguido durante el proceso.

Hess llegó a esta conclusión después de medir la cantidad de calor producido en la dilución de disoluciones acuosas de ácido sulfúrico de diferentes concentraciones. En sucesivas diluciones, esta cantidad permanecía constante independientemente de las etapas que se realizaran, sólo dependía de los estados inicial y final del sistema.

Una importante consecuencia de estas dos leyes es que se puede aplicar un tratamiento algorítmico sencillo a las ecuaciones termoquímicas para llegar a obtener con una precisión aceptable valores de ΔH que son imposibles de medir experimentalmente porque corresponden a procesos químicos cuyas características los hacen no aptos para la determinación calorimétrica. De hecho, es posible trabajar sobre reacciones químicas ficticias, químicamente irrealizables. Podemos decir, pues, que la ley de Hess carece de significado químico, y que no pasa de ser un convenio que surge del principio de conservación de la energía (Diemente, 1998). Si se conocen los calores de formación de las sustancias que intervienen en la reacción que se pretende estudiar, se pueden combinar las ecuaciones termoquímicas adecuadas con los coeficientes adecuados para hacer el balance energético global de la reacción. El tratamiento matemático evalúa las transferencias energéticas involucradas en el ciclo de reacciones.

Supongamos que queremos calcular $\Delta H^0_{298}[\mathbf{C_2H_{6\,(g)}}]$, la entalpía normal de formación del gas etano a 298 K. La ecuación química correspondiente a esta reacción es:

$$2C_{(\text{grafito})} + 3H_{2\,(g)} \rightarrow C_2H_{6\,(g)}$$

Dado que haciendo reaccionar grafito con hidrógeno no se genera etano, no se puede obtener $\Delta H^0_{f,298}[C_2H_{6\,(g)}]$ por determinación calorimétrica; pero, basándonos en la conservación de la energía, podemos cuadrar matemáticamente el recuento de las transferencias energéticas relacionadas con esta reacción imposible. Dado que la entalpía es una función de estado del sistema, su variación asociada a cualquier proceso solamente depende de los estados inicial y final del sistema. Así, como disponemos de los valores experimentales de las variaciones de entalpía correspondientes a las combustiones del grafito, del hidrógeno gaseoso y del etano (obtenidos empíricamente con una bomba calorimétrica), aplicaremos a estas reacciones las leyes de la Termoquímica. Tomemos, pues, un camino de reacción ficticio basado en varias combustiones auténticas para las cuales disponemos de datos calorimétricos:

$$C_{(\text{grafito})} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)} \qquad \Delta H^0_1$$

$$H_{2\,(g)} + \frac{1}{2}O_{2\,(g)} \rightarrow H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^0_2$$

$$C_2H_{6\,(g)} + \frac{7}{2}O_{2\,(g)} \rightarrow 2CO_{2\,(g)} + 3H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^0_3$$

Los algoritmos que hay que aplicar a estas tres ecuaciones termoquímicas para transformarlas en la total son los siguientes: multiplicación de las ecuaciones 1ª y 2ª por los coeficientes 2 y 3, respectivamente; aplicación de la ley de Lavoisier-Laplace para invertir el sentido de la ecuación 3ª; y aplicación de la ley de Hess para sumar las tres ecuaciones y obtener el balance entálpico global.

$$2C_{(\text{grafito})} + 2O_{2\,(g)} \rightarrow 2CO_{2\,(g)} \qquad 2 \cdot \Delta H^0_1$$

$$3H_{2\,(g)} + \frac{3}{2}O_{2\,(g)} \rightarrow 3H_2O_{(l)} \qquad 3 \cdot \Delta H^0_2$$

$$2CO_{2\,(g)} + 3H_2O_{(l)} \rightarrow C_2H_{6\,(g)} + \frac{7}{2}O_{2\,(g)} \qquad -\Delta H^0_3$$

$$2C_{(\text{grafito})} + 3H_{2\,(g)} \rightarrow C_2H_{6\,(g)} \qquad \Delta H^0_{f,298}[C_2H_{6\,(g)}] = 2 \cdot \Delta H^0_1 + 3 \cdot \Delta H^0_2 - \Delta H^0_3$$

esto es, el valor de variación de entalpía que no podíamos medir de forma directa. Utilizando cálculos sobre variaciones de entalpías de combustión relacionadas con la reacción de formación, se puede obtener la variación de entalpía de formación.

La más destacada aplicación de la Ley de Hess toma la forma del ciclo de Born-Haber. Éste es un ciclo de ecuaciones termoquímicas a través del cual se puede calcular la energía reticular de un cristal iónico, definida como la diferencia de energía entre el cristal y sus iones separados. La energía reticular no es medible experimentalmente, pero se puede calcular en función de magnitudes medibles. Las ecuaciones termoquímicas que forman el ciclo de Born-Haber corresponden a pasos intermedios de una síntesis teórica que a partir de los iones separados obtiene el cristal iónico mediante las energías de sublimación o vaporización, disociación, potenciales de ionización y afinidades electrónicas del catión y del anión involucrados.

Otro ejemplo destacado de aplicación de la ley de Hess es la determinación teórica de la variación de entalpía asociada a una reacción química entre sustancias puras, cuando realmente en el laboratorio se trabaja con los reactivos en disolución. Para realizar el cálculo deben conocerse las variaciones de entalpía correspondientes a la obtención de las disoluciones de los reactivos, y la variación de entalpía de la reacción en disolución. Estos valores pueden obtenerse por determinación experimental (calorimétrica), y la variación de entalpía teórica de la reacción entre los reactivos puros se calcula mediante la ley de Hess. Un ejemplo destacado que se utiliza con profusión en la enseñanza secundaria es el de la reacción de neutralización entre el ácido clorhídrico y el hidróxido de sodio. A la vista del impacto que tiene esta aplicación práctica de la ley de Hess, que es una cuestión recurrente en los exámenes de Selectividad, en la secuencia *Termoquímica* hemos incluido tres actividades mediante las cuales se ayuda a los alumnos a diseñar una estrategia para hallar la variación de entalpía teórica y a realizar las experiencias y los cálculos que permiten ofrecer una respuesta numérica y razonar sobre el proceso que ha conducido al resultado final.

Para expresar correctamente un calor de reacción no basta con enunciar la variación de entalpía que lo resume. También han de especificarse la naturaleza química, el estado de agregación y la cantidad de sustancia de los reactivos y de los productos, así como las condiciones de presión y temperatura en las que la reacción tiene lugar. Las tres primeras informaciones quedan indicadas al escribir la ecuación química, y las dos últimas se añaden a la derecha de la ecuación, donde se declara la variación de entalpía.

Esta expresión que combina una ecuación química y la declaración de su correspondiente entalpía de reacción recibe el nombre de ecuación termoquímica, y expresa todos los datos que se requieren para reproducir experimentalmente el calor de la reacción. Por ejemplo:

$$\mathbf{Fe_2O_{3\,(s)} + 3H_{2\,(g)} \rightarrow Fe_{(s)} + 3H_2O_{(l)}}\ \Delta H^0_{298} = \mathbf{-33{,}3\ kJ}$$

La ecuación termoquímica anterior indica que cuando un mol de óxido férrico sólido reacciona con tres mol de hidrógeno gaseoso para formar un mol de hierro sólido y tres mol de agua líquida, se liberan al entorno 33,3 kJ de energía por calor. Los paréntesis (s), (l), (g) indican el estado de agregación de las sustancias, sólido, líquido y gas, respectivamente. Para los procesos que tienen lugar en disolución debe indicarse la concentración de los reactivos y productos (la dilución infinita se indica con el superíndice ^{0}), y el disolvente se especifica entre paréntesis; por ejemplo, fase acuosa se simboliza con el paréntesis (aq).

Las condiciones de la reacción se expresan con la variación de entalpía. El hecho de que se trate de un valor de ΔH indica que la reacción tiene lugar a presión constante, y el superíndice ^{0} expresa que el calor de reacción es normal, referido a la presión de 1 bar. El subíndice $_{298}$ indica la temperatura en la escala termodinámica absoluta, que, en lugar de subíndice también puede expresarse entre paréntesis. El signo menos delante del valor

de ΔH informa de que la reacción es exotérmica, y libera al entorno por calor 33,3 kilojulios de energía por cada mol de reactivo transformado. La expresión de la variación de entalpía en el múltiplo de la unidad SI no obedece solamente al orden de magnitud de la energía intercambiada (decenas de miles de J), sino también a la precisión con la que se expresa el dato (utilización de cifras significativas en la expresión de la medida).

Todo proceso químico a presión constante tiene asociada una variación de entalpía ΔH que se manifiesta como cesión o absorción de energía por calor al entorno y representa el balance neto de los cambios energéticos macroscópicos que han sucedido a lo largo del proceso, sin aportar información sobre el mecanismo por el que se producen estos cambios. Este mecanismo no entra en el marco teórico de la Termodinámica Clásica, porque actúa dentro del dominio microscópico de la materia; sin embargo, por su relevancia teórica y utilidad práctica, se ha definido una variación de entalpía específica que da cuenta de él.

Los cambios energéticos que tienen lugar en el sistema se deben a las rupturas y formaciones de interacciones químicas entre las partículas. Si el proceso es químico, necesariamente cambian enlaces químicos (iónicos, covalentes o metálicos), además de las interacciones intermoleculares débiles del tipo de enlaces de dispersión de London, enlaces de Van der Waals, enlaces de hidrógeno, etc.. En los procesos físicos solamente se producen cambios en las interacciones débiles.

El proceso de ruptura de cualquier interacción química es endotérmico: si la interacción existe en unas condiciones, entonces es estable, y para disociarla hay que aportar la suficiente cantidad de energía para que las partículas dejen de interaccionar.

A partir de los datos experimentales contenidos en las tablas termoquímicas, se han realizado estimaciones teóricas relativamente fiables de los calores a presión constante asociados a las rupturas de los enlaces químicos más relevantes. Los resultados de estas estimaciones se expresan mediante la variación de entalpía de enlace promedio, ΔH_{enlace}, que se define como la variación de entalpía equivalente al calor puesto en juego a presión constante en la ruptura del enlace de interés (por eso también se la conoce como energía de disociación de enlace). Los valores de la variación de entalpía de enlace son positivos: $\Delta H_{\text{enlace}} > 0$, y se miden en J/mol. Se calculan, por lo general, a partir de datos espectroscópicos (Price, 1998, p. 27).

En algunos escritos científicos y libros de texto de enseñanza secundaria se utilizan terminologías obsoletas o simplificadas para referirse a la variación de entalpía de enlace promedio, a la que en ocasiones se llama *entalpía de enlace*, *calor de enlace*… La primera expresión no es admisible; la segunda no está recomendada por la comunidad científica, porque el calor de enlace solamente es equivalente a la variación de entalpía de enlace si se trabaja en condiciones de presión constante. Sin embargo, la comunidad científica admite el término *energía de enlace* como una aproximación a ΔH_{enlace}, puesto que la diferencia entre ambas no suele ser significativa (Levine, 2002).

ΔH_{enlace} es un estimador de la fortaleza de un enlace, porque representa el promedio de la cantidad de energía que ha de aportarse para eliminar una interacción dada, y la estabilidad de los enlaces químicos obliga a aportar una cantidad de energía tanto mayor cuanto más fuerte sea la interacción entre las partículas. Por ejemplo, un enlace múltiple entre dos átomos es más fuerte que un enlace sencillo, y por ello ΔH_{enlace} (múltiple) > ΔH_{enlace} (simple). En *Tabla 26* (pág. 523) se ofrece un ejemplo de la influencia del orden de enlace en el valor de la cantidad de energía necesaria para disociarlo.

En una molécula diatómica, ΔH_{enlace} indica de manera muy precisa la fuerza del enlace entre los átomos. En las sustancias poliatómicas, como la cantidad exacta de energía que hay que aportar para romper una interacción depende de la estructura atómico-molecular del compuesto, ΔH_{enlace} no deja de ser una aproximación cuya utilidad es mayor cuanto más sencillo sea el compuesto. Si el cálculo se refiere a moléculas diatómicas, o poliatómicas cuyos enlaces sean todos equivalentes, los valores numéricos de las entalpías de enlace tienen una precisión admisible, porque las contribuciones vibracionales y rotacionales a la energía de los enlaces suelen ser despreciables en comparación con las contribuciones electrónicas. Pero si en la molécula existen dos o más tipos de enlace, el valor de ΔH_{enlace} no proporciona una estimación rigurosa, porque la ruptura o formación de un enlace dado se ve afectada por la presencia de otros enlaces diferentes en las inmediaciones. La precisión se resiente más con las sustancias en estado líquido o sólido, en cuyo caso la influencia de las fuerzas intermoleculares en el entorno de los enlaces hace que se lleguen a presentar desviaciones incluso superiores al 10%.

Para poder trabajar con compuestos orgánicos de estructura compleja se incluyen correcciones que estiman aspectos como la tensión en pequeños compuestos de tipo cíclico, las energías de resonancia en compuestos conjugados y las energías estéricas en compuestos voluminosos.

A pesar de los inconvenientes que traen estas correcciones, es útil el disponer de tablas de ΔH_{enlace}, porque a partir de sus datos se pueden calcular variaciones de entalpía de resonancia e incluso valores aproximados de calores de reacción correspondientes a sustancias químicas para las cuales no se dispone de datos calorimétricos. Por ejemplo, si en la reacción interviene alguna especie nueva, recientemente sintetizada, para la que no se dispone aún de la variación de entalpía de formación, ésta se puede calcular aplicando las leyes de la Termoquímica a los valores de ΔH_{enlace}: se hace un balance de la variación de energía total, restando las contribuciones de los enlaces químicos que se rompen en los reactivos ($\Delta H_{enlace} > 0$) a las contribuciones de los enlaces formados en los productos ($\Delta H_{enlace} < 0$). El balance total de energía da una aproximación aceptable del valor de la variación de entalpía de la reacción y, por tanto, permite conocer de antemano si el proceso es endotérmico o exotérmico, lo cual depende de la estabilidad que el sistema gane o pierda como consecuencia de la ruptura de enlaces en los reactivos y la formación de nuevos enlaces en los productos:

Son reacciones exotérmicas aquéllas en las que la formación de enlaces altamente estables en los productos compensa el aporte energético necesario para romper enlaces en los reactivos; como consecuencia de la estabilización del sistema, una parte del excedente neto de la energía involucrada en la reacción se transfiere al entorno, lo que a su vez se traduce, a escala macroscópica, en un aumento de la energía del entorno.

Por el contrario, en las reacciones endotérmicas, la liberación de energía que se produce con la formación de los enlaces de los productos no es suficiente para superar el aporte energético neto que se requiere para romper enlaces en los reactivos, y por ello el sistema, en total, ha absorbido energía del entorno.

El mecanismo de los intercambios energéticos que suceden a lo largo de una reacción química puede resumirse como sigue:

Primero, ha de aportarse una cantidad inicial de energía para comenzar la reacción, o de lo contrario los reactivos seguirán siendo estables en las condiciones dadas. Esta cantidad de energía ha de ser suficiente como para superar la barrera energética de disociación de los enlaces. Iniciada la reacción, en el sistema se producen simultáneamente numerosos procesos de ruptura de enlaces y de formación de nuevas interacciones que generan productos. La recombinación de los fragmentos moleculares disociados es exotérmica porque supone la formación de enlaces estables. La exotermia o endotermia de la reacción se debe, respectivamente, a la liberación o absorción neta de energía que se produce como consecuencia de la formación de los productos en comparación con la cantidad de energía necesaria para fragmentar las moléculas de los reactivos.

- El segundo principio. Entropía, reversibilidad y espontaneidad

En la naturaleza, todos los procesos hacen pasar el sistema por diferentes estados de no-equilibrio, y tienden hacia el equilibrio con una velocidad finita. En este sentido, una de las aplicaciones más interesantes de la Termodinámica a la Química consiste en suministrar información sobre el equilibrio de los sistemas.

Dependiendo de las posibilidades de recorrer en uno u otro sentido la sucesión de los estados intermedios, los procesos termodinámicos pueden clasificarse como reversibles o irreversibles:

Se define un proceso termodinámico reversible como aquél mediante el cual el sistema pasa por una sucesión de estados que son de equilibrio o difieren infinitesimalmente del equilibrio (procesos cuasiestáticos), de tal manera que un cambio infinitesimal en las condiciones puede hacer que el sistema recorra los estados intermedios en sentido contrario y evolucione hasta su estado inicial. Si, por el contrario, el proceso se realiza a través de algún estado o estados de no-equilibrio, el proceso se denomina irreversible. Que un proceso sea termodinámicamente irreversible no significa que el sistema no pueda volver a su estado inicial, sino que los cambios infinitesimales en

las condiciones del proceso no son capaces de hacer que la sucesión de estados intermedios pase de ser recorrida en un sentido al contrario.

Dado que los procesos reales suceden siempre como consecuencia de algún desequilibrio finito, son todos irreversibles a causa de fenómenos tales como la fricción, la ausencia de un equilibrio térmico preciso, la turbulencia o los procesos de mezcla. Así pues, las transformaciones termodinámicas reversibles no dejan de ser una idealización, porque no existe ningún proceso termodinámico natural que sea reversible. No obstante, alguno puede considerarse reversible en la práctica, si el tiempo necesario para que suceda tiende a infinito; entonces, los investigadores disponen de tiempo suficiente para intervenir en las condiciones del proceso y hacer que el sistema no tienda a evolucionar en ningún sentido.

Nuestra experiencia nos indica que todo fenómeno natural ocurre siempre sólo en un sentido y nunca en el contrario. Por ejemplo, si dejamos caer un huevo desde cierta altura, éste se romperá al estrellarse contra el suelo, en un proceso que verifica el primer principio de la Termodinámica. Nunca observaremos el proceso inverso, esto es, que el huevo roto se recomponga espontáneamente y ascienda desde el suelo hasta nuestra mano… a pesar de que este segundo proceso también estaría de acuerdo con el primer principio. Queda claro que el primer principio de la Termodinámica no aporta información sobre el sentido natural de los procesos y tampoco explica por qué ninguna máquina térmica cíclica es capaz de transferir completamente por trabajo la energía que ha absorbido previamente por calor.

La tendencia natural de los sistemas a evolucionar en un único sentido se expresa termodinámicamente mediante la noción de espontaneidad:

Se considera que un proceso es espontáneo en unas condiciones determinadas cuando en dichas condiciones sucede sin intervención externa. Si un proceso tiene lugar espontáneamente, es imposible que ocurra el proceso inverso por sí solo, sin que previamente se alteren una o varias de las condiciones. Esta definición de la espontaneidad como la tendencia de los procesos a suceder en unas condiciones dadas se remonta al siglo XIX. De hecho, el término espontaneidad se debe a J. Thompson, que en 1813 lo utilizó en un trabajo sobre la inflamación. En la actualidad, algunos autores insisten en que esta definición de espontaneidad se ha quedado anclada en la Termodinámica Clásica del XIX, sin conexión con las ideas contemporáneas de la Termodinámica Estadística que permiten interpretar los mecanismos microscópicos por los que se explica la tendencia de los procesos a suceder.

Desde hace más de un siglo, los científicos intentaron relacionar la evolución de los sistemas naturales con los cambios energéticos que tienen lugar durante los procesos físicos y químicos. En un principio, se aceptó una supuesta tendencia de los sistemas a evolucionar hacia estados de energía mínima. Según esta afirmación, las reacciones químicas deberían producirse siempre en el sentido del máximo desprendimiento de

energía por calor. Éste es el principio del trabajo máximo, o de Thomsen-Berthelot:

«*Para que una reacción química se pueda producir a una temperatura mantenida invariable, es necesario que esta reacción venga acompañada de un desprendimiento de calor.*»

Sin embargo, la experiencia nos indica que el balance energético de muchas reacciones químicas es endotérmico. Se hace evidente que el criterio entálpico no basta para conocer el sentido natural de los procesos termodinámicos. El balance energético nos permite conocer la magnitud del cambio, pero no predecir en qué sentido sucede éste (Boohan y Ogborn, 1996).

En 1883, van't Hoff propuso que la medida de la afinidad de una reacción que sucede a presión y temperatura constantes no es el balance energético neto del proceso, sino el descenso de la energía *libre*, que se define como la energía de la que dispone el sistema para seguir evolucionando. Gibbs continuó los estudios de van't Hoff, y añadió conocimientos de la mecánica estadística para concretar cómo desciende la energía *libre* en los sistemas reales (1902). La afinidad química pasó a interpretarse mediante las ecuaciones de Gibbs-Helmholtz. En estas contribuciones teóricas se basaría posteriormente Boltzmann para demostrar el carácter probabilístico de la variable entropía en función de las propiedades atómico-moleculares del sistema.

Ya hemos dicho que el primer principio de la Termodinámica no explica ni la tendencia de los sistemas a evolucionar en un único sentido ni la imposibilidad de alcanzar el rendimiento del 100% con las máquinas térmicas. Estos hechos se explican mediante el segundo principio, que constituye una generalización de la experiencia y está justificado por los postulados de la Mecánica Estadística como consecuencia de ciertas suposiciones sobre los niveles de energía moleculares.

Existen varios enunciados del segundo principio. El más conocido es el de Kelvin-Planck, formulado por W. Thomson en 1851 y posteriormente reformado por M. Planck. En este enunciado se parte de la imposibilidad de construir una máquina que realice un proceso cíclico intercambiando energía por calor a una sola temperatura de manera que proporcione una cantidad equivalente de energía por trabajo. El segundo principio no prohíbe la conversión completa de calor en trabajo en un proceso acíclico.

«*Es imposible construir una máquina térmica que, operando cíclicamente, no produzca más efecto que la absorción de calor de un foco calorífico y la realización de una cantidad equivalente de trabajo sobre el entorno.*»

El segundo principio revela, por lo tanto, la imposibilidad de que exista el móvil perpetuo de segunda especie, máquina cíclica que convierte calor en trabajo con un 100% de rendimiento. Si tal máquina existiera, se podría utilizar la atmósfera como fuente de energía, y absorber continuamente de ella energía por calor, para luego transformarla por completo en trabajo útil; este funcionamiento estaría de acuerdo con el primer principio, aun siendo contrario a la experiencia.

Un enunciado alternativo y equivalente del segundo principio es el propuesto por Clausius en 1850:

«*Es imposible que un sistema realice un proceso cíclico cuyos únicos efectos sean la absorción de calor de un foco calorífico (foco frío) y la cesión de una cantidad igual de calor desde el sistema hacia un foco de mayor temperatura (foco caliente).*»

En 1854, el propio Clausius reformularía este Principio:

«*El calor no pasa de un cuerpo caliente a uno frío sin que ocurra simultáneamente algún cambio.*»

Además de poner de manifiesto la imposibilidad del móvil de segunda especie, el segundo principio conduce a diversas conclusiones sobre el equilibrio de los sistemas reales. Por ejemplo, es la base teórica de la ley de acción de masas, que permite determinar las concentraciones de equilibrio de varios gases en una mezcla gaseosa. Pero el segundo principio tuvo otras dos utilidades trascendentales:

En primer lugar, proporcionó a Kelvin la base para definir una escala termodinámica de temperaturas independiente de las propiedades de las sustancias: la escala absoluta de temperaturas o escala Kelvin, cuyo mínimo valor responde a la situación en que las partículas de los sistemas materiales carecen de energía rotacional, vibracional y translacional. Esta temperatura es el cero absoluto o cero Kelvin, equivalente a aproximadamente –273,15 ºC. Recordemos que la temperatura del gas ideal en el punto triple del agua es de 273,16 K (Levine, 2002, p. 98). A partir del cero absoluto, cada unidad Kelvin (1 K) introduce en el sistema una cantidad determinada de energía que se relaciona directamente con la energía cinética promedio de las partículas del sistema. La unidad SI de temperatura termodinámica es el Kelvin (*ISO Standard Handbook*, vol. 2, 1992).

Además, el segundo principio de la Termodinámica sirvió a Clausius para definir en 1865 una nueva función de estado extensiva denominada entropía *S*. Recordemos que, a su vez, el primer principio había permitido introducir la función de estado energía interna *U*. Según el segundo principio, la entropía se define como un criterio para conocer la evolución de un sistema aislado. Clausius enunció la función de estado *S* en 1854, y la denominó *Verwandlungsinhalt*, esto es, capacidad de transformación; también le dio el nombre de valor equivalente, por la conservación de su cantidad en las transformaciones de calor en trabajo. Más adelante la renombró como entropía (del griego *trope*, transformación), porque sirve para describir la transformación de calor en trabajo.

Supongamos un sistema cerrado que experimenta un ciclo de Carnot (ciclo reversible que consta de dos etapas isotérmicas a diferentes temperaturas y de dos etapas adiabáticas alternadas). En él se verifica que:

$$\frac{\partial q_{\text{reversible}}}{\mathrm{d}T} = 0$$

siendo T la temperatura termodinámica absoluta del sistema, y $q_{\text{reversible}}$ la cantidad

infinitesimal de energía transferida reversiblemente por calor a la temperatura *T*.

Como la integral a lo largo de cualquier ciclo reversible es cero, si extendemos este resultado a un ciclo reversible arbitrario eliminando la condición de que la energía se intercambie por calor sólo a las temperaturas de los focos frío y caliente, concluimos que $\partial q_{\text{reversible}}/\partial T$ representa la diferencial de una función de estado que es la entropía *S*, independiente del camino recorrido en el ciclo:

$$\mathbf{d}S = \frac{\partial q_{\text{reversible}}}{\mathbf{d}T} = \mathbf{0}$$

Éste es el teorema de Clausius, válido para cualquier sistema cerrado que opere en un ciclo reversible. Si un sistema sufre un proceso irreversible, los estados intermedios pueden ser de no-equilibrio, por lo que la temperatura (y con ella la entropía) podría no estar definida. Así pues, la enunciación más rigurosa de la entropía se refiere a un proceso en el no se produzcan cambios irreversibles en el sistema (*ISO Standard Handbook*, vol. 2, 1992), porque, en un proceso irreversible, d*S* no es necesariamente igual a $\partial q_{\text{reversible}}/\partial T$. Pero puede definirse una ΔS que depende sólo de los estados inicial y final y es igual para cualquier proceso, reversible o irreversible. De hecho, existen múltiples formulaciones para las variaciones de entropía asociadas a distintos tipos de procesos de interés (por ejemplo, Infelta, 2002).

La entropía es una función de estado extensiva. Para una sustancia pura, se puede definir la entropía molar como $S_m = S/n$, siendo *n* el número de mol de la sustancia. Las unidades de la entropía son J/K (SI) o cal/ºC. También existen, aunque no son habituales, la unidad Clausius (Cl), que verifica la equivalencia 1 Cl ≡ 4 184 J/K (*Quantities, units, and symbol in Physical Chemistry*, 1993); y la unidad entrópica (*entropy unit, e.u.*), definida tal que 1 e.u. ≡ 4 184 J/(K·mol) (*Handbook of Chemistry and Physics*, 1999-2000).

Ni la entropía ni la energía deben considerarse entidades materiales: son funciones matemáticas que tienen ciertas propiedades. A este respecto, algunos autores de libros científicos proponen emplear la terminología "función entropía" y "función energía" para evitar la conceptualización de estas entidades matemáticas como "cosas".

La variación de la entropía proporciona un criterio de evolución para los sistemas aislados. En efecto, cualquier proceso en un sistema aislado cumple que, si el cambio es reversible, $\oint \mathbf{d}S = 0$. Si el proceso es irreversible, se verifica $\oint \mathbf{d}S > 0$. Así pues, para un sistema aislado, se puede escribir:

$\oint \mathbf{d}S \geq 0$ Desigualdad de Clausius

Resumiendo: la entropía de un sistema aislado aumenta como consecuencia de cualquier proceso irreversible que experimente el sistema. Así pues, en teoría la variación de la entropía de un sistema aislado proporciona un criterio para conocer la evolución del mismo. Las variaciones de entropía y las relaciones del segundo principio permiten determinar, por ejemplo, el sentido en que se producen los cambios en las corrientes

dinámicas de gases, como es el caso de los que se observan a través de una onda de choque estacionaria.

En la práctica, la Termodinámica irreversible proporciona métodos cuantitativos para conocer cómo varía la entropía de un sistema sin contar con los efectos de las interacciones con el entorno. Estos cambios que se producen en la entropía dentro del sistema están muy relacionados con los flujos de fusión ordinaria debidos a los gradientes de masa, y a la conductividad calorífica debida a los gradientes de temperatura; pero, además de estos efectos directos, también influyen los fenómenos de difusión térmica (flujos de masa debidos a los gradientes de temperatura) y el efecto Dufour (flujos de energía debidos a gradientes de masa). Estas aproximaciones teóricas aportan interesantes interpretaciones sobre la Termodinámica del estado continuo y de los procesos pseudo-reversibles. A partir de ellas puede utilizarse el teorema de Onsager para estudiar los efectos termoeléctricos y termomagnéticos, fenómenos asociados al flujo simultáneo de corriente eléctrica y de energía por calor (ver Callen, 1981, cap. 17, pp. 287 y ss.).

La variación total de entropía de un proceso que tenga lugar en un sistema no aislado debe calcularse con referencia al universo, que es el sistema aislado por definición. Así, la variación de entropía del universo es la suma de las contribuciones entrópicas del sistema y del entorno:

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{entorno}}$$

En un proceso reversible, la variación de entropía del universo permanece constante, aunque las variaciones de entropía del sistema y de los alrededores sí pueden variar: $\Delta S_{\text{universo}} = 0$. Para un proceso irreversible, $\Delta S_{\text{universo}} > 0$.

Dado que todo proceso real es irreversible, la entropía del sistema aislado siempre aumenta, hasta que alcanza el valor máximo compatible con las condiciones impuestas. Cuando la entropía llega a su valor máximo se detiene la evolución macroscópica del sistema, porque a partir de este punto, cualquier cambio de estado termodinámico haría que la entropía disminuyera. Ya que, por definición, un sistema aislado alcanza el equilibrio cuando todo proceso se detiene, podemos afirmar que el equilibrio termodinámico en un sistema aislado se alcanza cundo la entropía del sistema es máxima.

Sobre esta base, podemos formular un tercer enunciado para el segundo principio de la Termodinámica:

«La expresión $\boldsymbol{\partial q_{reversible}/\partial T}$ es la diferencial de la función de estado entropía S, función que adquiere su valor máximo en el equilibrio de un sistema aislado; por tanto, cualquier proceso verifica $\Delta S_{universo} \geq 0$.»

La razón por la que *S* aumenta hasta su máximo en los procesos que suceden en los sistemas aislados puede deducirse de la interpretación atómico-molecular de la entropía, que se enuncia a continuación. Sin esta interpretación microscópica de los

principios de la Termodinámica y de sus variables representativas, las definiciones e interpretaciones que se pueden construir sobre los procesos físicos y químicos son meramente operacionales (Battino, 2007).

Si se analizan los procesos naturales desde el punto de vista de una supuesta tendencia hacia el orden o el desorden, se observa que existe una tendencia del universo en su conjunto a evolucionar hacia un estado de mayor desorden, esto es, a la dispersión de la energía dentro del sistema y entre el sistema y su entorno (Left, 2012a). El aumento de entropía del universo asociado al proceso proporciona una expresión cuantitativa aproximada de esta tendencia. Se podría afirmar, por tanto, que la entropía de un sistema aislado aporta una medida del grado de desorden de sus partículas, entendiendo el término desorden en la acepción de Boltzmann, que se refería a los aspectos energéticos a nivel molecular (Lambert, 2002b): cuanto más se distribuyen los cuantos de energía entre los niveles energéticos permitidos, más probable es el estado (porque está representado por un mayor número de microestados), y mayor es el valor de la entropía. Desde esta perspectiva, la variación de la entropía mide el flujo unidireccional de energía térmica a una temperatura dada.

La entropía no es en rigor una medida del desorden de un sistema, salvo que consideremos dos componentes entrópicas: una entropía configuracional, o de distribución aleatoria de las partículas, y una entropía térmica que exprese la dispersión del sistema entre los microestados cuánticos posibles, introduciendo la idea de que la energía asociada al movimiento de las partículas hace que éstas adopten diferentes configuraciones espaciales y energéticas (Lambert, 2006) dentro de las posibilidades permitidas de dispersión de los cuantos de energía rotacional, vibracional, translacional y electrónica (Bickford, 1982). Boltzmann había definido un desorden molar, relacionado con la velocidad media de las partículas del sistema, y un desorden molecular, relacionado con la distribución espacial de las partículas.

Sin introducir la dimensión térmica de la entropía, los aspectos meramente configuracionales no llegan a expresar por sí solos el significado microscópico de la misma; de hecho, si solamente tomamos el punto de vista de la aleatoriedad de las partículas del sistema, todos los gases a una presión y a una temperatura dadas deberían tener el mismo valor de entropía, lo cual no sucede (Bickford, 1982). Por este motivo, algunos autores abogan por evitar la utilización del término desorden en relación con la entropía, por considerarlo coloquial y obsoleto (Lambert, 2002a, 2002b), y proponen asociar la entropía con la dispersión y distribución de energía en el sistema a una temperatura dada, teniendo en cuenta dos aspectos (Lambert, 2006): cuánta energía se dispersa (*how much*) y en qué extensión (*how widely*). Para Lambert, (2002b), el término desorden es tan cotidiano que, aunque los científicos lo utilizaron desde finales del siglo XIX en un sentido científico, con el tiempo los "autores populares" se han apropiado del término y lo han convertido en un pseudo-tecnicismo con el que pretenden interpretar cualquier evento que implique caos, desorganización o declive, como por ejemplo las

relaciones personales disfuncionales o la decadencia de las sociedades (Lambert, 2002b). Sin embargo, el propio Lambert reconoce (2006) que el término dispersión energética, tal como lo expresan en algunos libros de texto, es una mera variante del término entrópico configuracional, lo que implícitamente nos lleva de nuevo a una idea inadecuada de la entropía como una tendencia a la dispersión espacial de la materia.

En general, los estados desordenados tienen mayores probabilidades de suceder que los estados ordenados. Sin embargo, orden y desorden son conceptos subjetivos, mientras que la probabilidad no. Por ello, es más riguroso relacionar la entropía con la probabilidad de un estado energético en lugar de con el desorden molecular del estado. Esta relación supone la introducción de la Termodinámica Estadística, tarea que también realizó Boltzmann, descubridor de la relación entre entropía y probabilidad.

Estadísticamente, el aumento de entropía en un sistema aislado que evoluciona hacia el equilibrio se relaciona directamente con el paso de estados menos probables a estados más probables, siendo el estado de equilibrio termodinámico el más probable. Esta relación es válida para cualquier sistema que cuente con una colectividad de partículas lo suficientemente grande como para que puedan aplicarse la nociones de la Mecánica Estadística. Si esta condición se verifica, la entropía S del sistema es función de la probabilidad p del estado termodinámico, tal que:

$$S = a + k \cdot \ln \Omega$$

donde k y a son valores constantes. La constante k es la constante de Boltzmann, de valor $k = \frac{R}{N_A}$, con R la constante de los gases ideales y N_A el número de Avogadro. La constante k representa un papel fundamental en la mecánica estadística, interviniendo en las ecuaciones que gobiernan la distribución de las moléculas del sistema entre los niveles de energía permitidos y en la distribución entre los microestados cuánticos. El valor Ω da una idea del número de posibilidades diferentes para distribuir las partículas de manera que tengan la misma energía; esto es, indica el número de modos por los que la energía U del sistema puede distribuirse entre las partículas del sistema (Price, 1998, p. 45). La entropía de cualquier macroestado (estado termodinámico macroscópico) es proporcional al logaritmo neperiano del número de microestados (estados atómicos) asociados con dicho macroestado. Como el número de microestados es multiplicativo con respecto a la complejidad del sistema, si se toma el logaritmo de Ω en lugar del valor de Ω, el término $k \cdot \ln \Omega$ en la ecuación de S se convierte en aditivo, y S se expresa como parámetro extensivo, con lo cual se acomoda al formalismo termodinámico (Callen, 1981, p. 312).

A nivel microscópico, la entropía de un sistema está relacionada con la distribución de la energía entre los niveles energéticos atómico-moleculares permitidos para el sistema en el estado considerado. Por ello, el diamante tiene la más baja entropía molar de todas las sustancias, y se observa que las entropías molares tienden a aumentar a medida que aumenta el número de átomos, porque cuantas más partículas haya en el sistema, también es mayor el número de estados permitidos. La entropía molar también

aumenta con la complejidad de la estructura molecular, que incrementa el número de modos de distribución de los cuantos de energía (Bickford, 1982). También alcanzan mayores valores para los gases que para los líquidos, y mayores en éstos que en caso de los sólidos. El incremento de la entropía de un sistema como consecuencia de la elevación de la temperatura se explica a nivel microscópico como un mayor grado de dispersión de la energía debido al mayor número de microestados accesibles; aunque esta misma idea puede enunciarse en términos de desorden, quizá introduzca una visión antropomórfica del comportamiento de las partículas, según Lambert (2002a). Sin embargo, el mismo Lambert (2002a) propone expresiones como "microestados más densos", lo cual también puede llevar a considerar los microestados cuánticos de las partículas como lugares físicos donde las partículas materiales se pueden distribuir más o menos apelotonadas.

Los procesos macroscópicos de transferencia de energía (calor y trabajo) se pueden analizar atendiendo a dos aspectos: la variación que se produce en el número de niveles de energía permitidos entre un estado termodinámico y otro, y el cambio en las poblaciones de los niveles energéticos permitidos. Para un sistema cerrado, en el que es imposible el intercambio de materia con el entorno, el segundo principio de la Termodinámica introduce algunas restricciones en las variaciones de los niveles energéticos y las poblaciones de los mismos (Novak, 2003): cualquier variación en los niveles de energía disponibles requiere un cambio en la distribución de las partículas entre los niveles. Las partículas del sistema colisionan e intercambian energía entre ellas y con el entorno, y la distribución de los microestados tiende hacia la distribución energética más probable de acuerdo con la energía interna disponible, según la ecuación de Boltzmann. Una vez que se adopta esta distribución, el sistema alcanza el equilibrio interno, y tanto las variaciones en las poblaciones de los niveles energéticos como el número de niveles disponibles se hacen independientes del tiempo (Novak, 2003).

Por su relación con la aleatoriedad, la entropía se aplica en la teoría de la comunicación de Shannon como una medida de la información que se conoce. La ausencia de información sobre una situación es equivalente a una incertidumbre asociada a la naturaleza de la situación (entropía de la información). Al introducir el análisis entrópico, se recuentan las probabilidades de aquellos hechos que se excluyen mutuamente, y la entropía representa el número de impulsos por símbolo que puede emitir una fuente de información. Así, la relación entre la máxima velocidad de transmisión de señales para cada símbolo y la entropía de la fuente constituye la entropía relativa de la misma, que conviene definir de esta manera para que sus valores negativos revelen la redundancia de la fuente. El aumento de la entropía como consecuencia de un proceso irreversible se traduce como una pérdida de información sobre los aspectos posicionales y energéticos de las partículas del sistema.

Obsérvese que esta interpretación microscópica de la entropía es estadística, y por tanto solamente indica que los sistemas tienden a evolucionar hacia estados más probables; pero no está garantizado que un sistema aislado no evolucione

espontáneamente hacia un estado de menor probabilidad. Asimismo, aunque sea imposible revertir un proceso natural por el mismo camino termodinámico que ha recorrido previamente, la interpretación estadística del segundo principio deja abierta la posibilidad de que ocasionalmente esto podría suceder, porque un sistema aislado de tamaño finito solamente tiene un número finito Ω de configuraciones y, a lo largo de un tiempo suficientemente largo, pasará a través de muchas de ellas y puede que en algún instante absolutamente impredecible se encuentre en la configuración inicial, habiendo recorrido los estados intermedios en el orden exactamente inverso al que había tomado al comienzo del proceso. En este sentido, el segundo principio no es absoluto, sino relativo: su incumplimiento a escala macroscópica es altamente improbable. Por el contrario, el primer principio se relaciona con la conservación de la energía, la cual, de acuerdo con el teorema de Noether sobre la invariancia de las ecuaciones en determinadas transformaciones, es consecuencia de la homogeneidad temporal, esto es, de que las leyes naturales sean invariantes en las translaciones temporales (Solbes y Tarín, 2008).

Así pues, la validez del segundo principio se limita a aquellos sistemas en los que resulten indetectables las fluctuaciones de la probabilidad de los estados termodinámicos. Queda por tanto limitado a sistemas cuyo número de partículas es lo suficientemente grande como para que las fluctuaciones en torno al equilibrio no sean experimentalmente observables. Un ejemplo de violación del segundo principio de la Termodinámica es el movimiento browniano de las partículas de polvo o de las partículas coloidales suspendidas en un fluido: las pequeñas fluctuaciones que se producen en la presión del fluido que rodea las partículas generan a su vez fluctuaciones en torno a las condiciones de equilibrio. De manera similar se produce el ruido en un circuito electrónico, debido a las fluctuaciones aleatorias creadas por las corrientes internas de las densidades electrónicas en una resistencia (Levine, 2002, p. 103).

Por otra parte, dado que los estados de menor entropía preceden en el tiempo a otros de mayor entropía, el segundo principio señala la dirección en la que el tiempo aumenta en el sistema aislado Universo. En palabras del astrofísico Eddington, «la entropía es la flecha del tiempo», en tanto en cuanto indica la evolución del universo, y así en la noción de espontaneidad está implícita la idea del paso del tiempo. O, como se suele considerar, la entropía es la flecha termodinámica del tiempo, porque se han propuesto otras dos: la flecha cosmológica, que hace referencia a la expansión del Universo según el desplazamiento hacia el rojo debido al efecto Doppler, y la flecha microscópica del tiempo, ya que el decaimiento de los mesones K neutros no es simétrico con respecto a la inversión temporal. La última flecha es objeto de una gran controversia. Actualmente, también se discute si las flechas termodinámica y cosmológica están relacionadas.

Resumiendo: en cualquier proceso la energía total del sistema aislado se conserva (primer principio), y es la distribución energética la que determina la dirección en la cual es espontáneo el proceso, esto es, en aquélla que haga que el sistema tienda hacia estados más probables (segundo principio). En los textos en lengua inglesa es común encontrar el

término *driving force* para designar el mecanismo que explica la espontaneidad de los procesos. Aquí no entraremos a discutir esta expresión, que en el contexto español no tiene razón de ser.

Una consecuencia directa del segundo principio de la Termodinámica es el principio de la degradación de la energía, según el cual puede probarse que todo proceso implica una cantidad de energía inutilizable para su conversión por trabajo (es decir, ningún proceso tiene un rendimiento del 100% porque una parte de la energía transferida se pierde en procesos de calor no útiles para finalidades prácticas). De hecho, W. Thomson formuló en 1853 una variante del segundo principio en el que se recogía por primera vez un nuevo aspecto de la energía distinto de su conservación y de su transformación: la degradación o disipación de la energía, que se introdujo en el marco teórico termodinámico desde la perspectiva mecanicista concordante con el paradigma vigente en la época (Solbes y Tarín, 2008). En 1862 Clausius introdujo el término disgregación para definir el efecto del calor sobre los sistemas, cuantificable mediante la entropía (Howard, 2001): la disgregación o grado de división de los cuerpos es la distribución atómico-molecular, que aumenta cuando la acción de las transferencias de energía por calor es capaz de vencer las interacciones entre las partículas del sistema.

Con esta interpretación se explica, por ejemplo, el supuesto que habíamos planteado al comienzo de este apartado sobre la imposibilidad de que un huevo que ha caído al suelo y se ha roto, se recomponga y ascienda de nuevo hasta la altura inicial. Ambos procesos, el directo y el inverso, cumplen el primer principio, y la energía total involucrada se conserva; pero parte de ella se invierte inevitablemente en aumentar la temperatura del huevo y de la superficie del suelo en contacto con él, y la energía disipada no puede aprovecharse para realizar de manera controlada un nuevo proceso en el que suelo y huevo disminuyan su temperatura y éste ascienda nuevamente.

A finales del siglo XIX, la comunidad científica aceptaba que el segundo principio era válido para cualquier sistema, incluido el Universo en toda su extensión. De hecho, Helmholtz consideró que éste era uno de los pocos enunciados científicos válidos para cualquiera de los cuerpos naturales, lo cual abría la puerta para conectar entre sí las más diversas ramas de la Física. En la actualidad se considera que la aplicación del segundo principio en sistemas muy complejos no es rigurosa desde el punto de vista científico, porque la mayoría de las observaciones termodinámicas se han realizado sobre objetos tamaño muy inferior al astronómico y no existe garantía de que los resultados conocidos sean extrapolables a escala cósmica; e incluso a escalas inferiores no queda claro que los sistemas complejos los cumplan. Por ejemplo, todavía no se ha contrastado la hipótesis de si el funcionamiento de un organismo vivo, sistema abierto de gran orden interno y en no-equilibrio, verifica el segundo principio. Para estudiarlo puede definirse una entropía de no-equilibrio, y, de acuerdo con el segundo principio, la variación de la entropía del organismo puede ser positiva, negativa o nula; en todo caso, cualquier disminución en la entropía del sistema debe verse compensada por un incremento igual o mayor en la

entropía del entorno. Pero para demostrar cuantitativamente que esto sucede, se deben vencer dos grandes obstáculos: en primer lugar, se requiere una gran cantidad de datos sobre el metabolismo; en segundo lugar, a estos datos hay que aplicarles complejas ecuaciones de termodinámica irreversible, porque, sin ir más lejos, los procesos internos como el flujo sanguíneo, la difusión, las reacciones metabólicas… son irreversibles. Los análisis que se han realizado hasta la fecha no permiten verificar ni refutar que los sistemas vivos cumplan el segundo principio de la Termodinámica.

Pero supongamos que el segundo principio fuera aplicable al Universo en su totalidad. Entonces, mientras éste se hallara en evolución, su entropía crecería sin cesar, de manera que cada vez más energía se convertiría en energía inútil, disipada por calor. Cuando la entropía del universo alcanzase su valor máximo, se llegaría al equilibrio. En ese momento se produciría la muerte térmica del Universo, que se define como la carencia total de energía disponible para realizar trabajo. Todos los procesos se detendrían.

Actualmente, las especulaciones filosóficas que se divulgaron en el siglo XIX sobre esta supuesta muerte térmica no están admitidas en la comunidad científica más que como hipótesis. Hasta ahora no se dispone de pruebas que permitan afirmar que el segundo principio se incumple a escala cósmica, pero tampoco se puede refutar que suceda lo contrario. Al aplicar el segundo principio a la evolución del Universo, surgen numerosos interrogantes sin respuesta, en especial si se admite la hipótesis del *Big Bang*:

Aceptemos que el Universo pudiera evolucionar hasta un estado esencialmente igual al que precedió a la supuesta Gran Explosión. Entonces, la fase de contracción del Universo supondría una disminución de la entropía universal. Esta predicción coincide con los argumentos de quienes abogan por una relación directa entre las flechas termodinámica y cosmológica del tiempo, pero deja abiertos algunos problemas de difícil resolución: ¿cómo es un Universo cuya entropía decrece? ¿Podría el tiempo correr hacia atrás en un Universo en contracción? Y, si así fuera, ¿qué sucedería?

- El tercer principio. Entropías convencionales

En apartados previos hemos visto que los valores de ΔU y ΔH asociados a una reacción se pueden medir de manera experimental como los calores a volumen constante o a presión constante, respectivamente, y que los valores obtenidos hacen posible la tabulación de las entalpías convencionales de formación de los compuestos. Pero el valor de ΔS de una reacción química no se puede medir tan fácilmente: si se mide el calor irreversible e isotérmico no se obtiene el valor de ΔS porque, aunque a temperatura constante se verifica $\partial S = \partial q_{\text{reversible}}/\partial T$, la reacción es un proceso irreversible.

Una posible solución al problema consistiría en realizar el proceso de manera reversible dentro de una celda electroquímica; sin embargo, muy pocas reacciones tienen lugar en estas condiciones, y para construir una tabla de entropías convencionales no basta con un número tan limitado de datos.

Así pues, podemos afirmar que el segundo principio indica cómo medir variaciones de entropía, pero no proporciona una escala de entropías absolutas.

Aunque se podrían tabular variaciones de entropía de formación $\Delta S_{molar,T}$**[f(X)]** para cada sustancia X, se prefiere trabajar con las entropías convencionales de las sustancias referidas al estado normal. A estos valores se los conoce como *entropías absolutas*, a pesar de que se trata de valores relativos porque se basan en la asignación de una entropía arbitraria a cada elemento en su estado de referencia. Partiendo de aquí, se calcula la variación de entropía del proceso que convierte los elementos en el estado de referencia en la sustancia de interés en su estado normal.

El estado de referencia de la escala convencional de entropías es el elemento puro en su forma estable condensada (sólido o líquido) a la presión normal (p = 1 bar) en el límite en el que $T \rightarrow 0$ K (recordemos que el valor T = 0 K se considera inalcanzable). Por convenio, y dado que los elementos nunca se transmutan en las reacciones químicas, se asigna arbitrariamente el valor cero a la entropía molar de cualquier elemento en este estado: $S^0_{m,0}$**(X) =** $\lim_{T\rightarrow 0} S^0_{m,T}$**(X) = 0**. Solamente el helio permanece líquido cuando $T \rightarrow 0$ K a p = 1 bar, mientras que el resto de los elementos son sólidos en este límite. En caso de que entre la temperatura T de interés y el cero Kelvin se produzcan cambios de estado, éstos han de tenerse en cuenta a la hora de realizar los cálculos.

Si se quiere determinar la entropía convencional de un compuesto C, se considera un estado inicial formado por los elementos constituyentes de C, a los que llamaremos A y B, puros y separados a p = 1 bar y a una temperatura T. El estado final del sistema es el del producto C en las mismas condiciones de los reactivos A y B.

Para esta proceso genérico aA + bB $\rightarrow$ cC,

$$\Delta S^0_T = \mathbf{c} \cdot \Delta S^0_{m,T}\mathbf{(C)} - \{\mathbf{a} \cdot \Delta S^0_{m,T}\mathbf{(A)} + \mathbf{b} \cdot \Delta S^0_{m,T}\mathbf{(B)}\}$$

De la elección arbitraria del valor cero para la entropía elemental a la presión de 1 bar y temperaturas próximas al 0 K se obtiene que en el límite considerado $T \rightarrow 0$, los compuestos puros verifican también

$$S^0_{m,0}\mathbf{(C)} = \lim_{T\rightarrow 0} S^0_{m,T}\mathbf{(C)} = \mathbf{0}$$

La conclusión es que, al variar la presión isotérmicamente en el límite $T \rightarrow 0$, la entropía convencional de cualquier sustancia pura en equilibrio interno es cero.

Al margen de la escala convencional de entropías, para establecer una escala teórica se recurre al tercer principio de la Termodinámica, cuyos fundamentos se refieren a sistemas químicamente puros sometidos a la temperatura del cero absoluto:

Alrededor de 1900, T. W. Richards midió el valor de ΔG^0 en función de la temperatura absoluta T para distintos procesos químicos llevados a cabo de manera reversible en celdas electroquímicas. Entre 1906 y 1907, y sobre la base de los datos de Richards, W. H. Nernst señaló que todas las transformaciones de un cuerpo químicamente

puro y de densidad finita verifican que el valor de la pendiente de la representación de ΔG^0 frente a T tiende a cero cuando el valor de T se aproxima al cero absoluto. Esto es,

$$\lim_{T \to 0} \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_p = 0$$

Entonces, cualquier proceso en el cero absoluto sucede a entropía constante, siempre y cuando el sistema sea químicamente puro y de densidad finita:

$$\lim_{T \to 0} \Delta S_p = 0$$

El enunciado inicial de Nernst para el tercer principio puede formularse:

«*Un proceso entre fases puras cristalinas que ocurre en el cero absoluto no produce ningún cambio de entropía.*»

Nernst consideró válida esta expresión para cualquier transformación, porque había retomado el principio del trabajo máximo de Berthelot. A partir de él predijo que en cualquier cristal de retículo cristalino perfecto todas las partículas reducen progresivamente a cero su energía de vibración conforme va disminuyendo la temperatura hacia el cero absoluto. Pero posteriores estudios experimentales, entre los cuales destacan los de Simon, demostraron que este límite sólo es válido en aquellas transformaciones que implican únicamente sustancias puras, cada una de ellas en equilibrio interno. No se cumple en procesos como las transiciones en las que intervienen mezclas de sustancias impuras o líquidos superenfriados, que no se hallan en equilibrio interno.

De las reflexiones anteriores se obtuvo el enunciado de Nernst-Simon del tercer principio de la Termodinámica, por el que se afirma que:

«*En cualquier proceso isotérmico que implique solamente sustancias puras, cada una en equilibrio interno, la variación de entropía del sistema tiende a cero cuando la temperatura tiende a cero.*»

En efecto, si nos remitimos a la definición microscópica de la entropía, a 0 K el sistema se encuentra en su estado más bajo de energía,. Si este estado es un singlete, entonces $\Omega = 1$ y por lo tanto $S = 0$ (Price, 1998, p. 45). Si alguno de los estados excitados es todavía accesible, o si existen estados metaestables permitidos que no son de equilibrio, o si los efectos isotópicos introducen estados adicionales en el sistema, entonces se obtiene un valor de entropía residual no nulo.

Experimentalmente se observa una tendencia asintótica por la que, cuanto más baja es la temperatura absoluta de trabajo, más difícil resulta disminuirla. Sólo con dificultad se han alcanzado temperaturas que bajan de 10^{-6} K, y los métodos que se emplean para ello son tan extremos como la desmagnetización adiabática de sales paramagnéticas intensamente magnetizadas o la proyección de luz infrarroja de láser sobre gases a bajísimas presiones.

Generalizando estos resultados experimentales se suele afirmar que «*es imposible llegar al cero absoluto mediante una serie finita de procesos*». Esta afirmación constituye el Principio de inaccesibilidad del cero absoluto, que se considera un corolario del tercer principio de la Termodinámica en el sentido de que se ha deducido del enunciado de Nernst-Simon. De hecho, el mismo Nernst modificó su enunciado en 1912 para incluir la inaccesibilidad del cero absoluto como parte del tercer principio de la Termodinámica. Sin embargo, el argumento *ad infinitum* al que se recurre para demostrar esta relación no es en sí una prueba suficiente de la inaccesibilidad del cero absoluto:

Sea un sistema material en un estado definido por su temperatura absoluta inicial T_1 y por su volumen inicial V_1. Si sobre el sistema se realiza una expansión adiabática (con $V_2 > V_1$), ésta hace disminuir la temperatura de T_1 a T_2, tal que $T_2 < T_1$. Si posteriormente se procede a una compresión isotérmica, el sistema recupera el volumen inicial V_1. Aparentemente la sucesión de estos procesos lograría disminuir la temperatura de manera continua sin modificar el volumen del sistema. Pero el principio enunciado por Nernst predice que este resultado no es posible, porque la variación de entropía asociada a cualquier proceso isotérmico tiende a cero en las condiciones cercanas al cero absoluto. En consecuencia, para alcanzar el cero Kelvin se necesitaría un número infinito de operaciones.

Nótese que en el razonamiento no se ha introducido el concepto de irreversibilidad. Si los procesos planteados son irreversibles, cada etapa de expansión adiabática supondría un aumento de la entropía del sistema.

Lo que sí se puede demostrar a partir del enunciado de Nernst es que la entropía de las sustancias puras es igual en el cero absoluto, lo que sirve para construir la escala absoluta de entropías. Su fundamento teórico está en las observaciones de Planck, quien en 1910 amplió el enunciado de Nernst con una hipótesis complementaria:

«*La entropía de todo cuerpo químicamente puro, perfectamente cristalino y de densidad finita, en equilibrio termodinámico, es nula en el cero absoluto.*»

Planck estableció el cero absoluto como el origen de las entropías absolutas al asignar el valor cero a la entropía de cualquier sustancia pura cristalina y en equilibrio que se halle a $T = 0$ K. Esta asignación teórica se deriva de que el valor mínimo de entropía de una sustancia, que debe corresponder al máximo grado de ordenación termodinámica posible para la materia, solamente se alcanza en las condiciones del cero absoluto de temperatura:

A temperaturas suficientemente bajas, todas las sustancias forman cristales que representan la forma atómico-molecular más ordenada que se conoce. En el cero absoluto, un cristal perfecto dispone sus partículas con la mayor ordenación termodinámica posible. Por consiguiente, el valor más bajo de entropía de una sustancia (el cero entrópico) corresponde a las condiciones del cero Kelvin. Esta conclusión teórica permitió,

además de elaborar la escala de entropías absolutas, calcular constantes de equilibrio y tensiones de vapor de sustancias químicas puras.

Para hallar el valor de entropía correspondiente a cualquier sustancia que se halla a una temperatura T, basta integrar la función C_p correspondiente a la variación de temperatura desde el cero absoluto hasta el valor T_f:

$$S^0_{T_f} - S^0_0 = S^0_{T_f} = \int_0^{T_f} \left(\frac{\Delta C_p^0 \textbf{(sólido)}}{T} \right) dT$$

integral cuyo resultado es necesariamente positivo porque la entropía aumenta con la temperatura absoluta. Al representar C_p frente al $ln\ T$, o bien C_p/T frente a T, el área bajo la curva entre los valores de abscisa $T = 0$ y T_f es el valor de $S^0_{T_f}$.

La comparación entre los valores de entropía experimentales y los teóricos ha probado la validez del tercer principio de la Termodinámica y ha aportado valiosa información sobre algunas estructuras que adoptan los sólidos a temperaturas extremadamente bajas (por ejemplo, el hielo de agua, el óxido nítrico…) y sobre la distribución de los niveles de energía permitidos para moléculas aparentemente sencillas, como la rotación restringida del etano.

Si se conoce S^0_0 y se dispone de datos experimentales de C_p, se puede obtener el valor de la entropía de cualquier sustancia sólida a temperaturas inferiores al punto de fusión, siempre y cuando el proceso tenga lugar a la presión correspondiente a los datos de C_p. Como las propiedades termodinámicas de los sólidos y de los líquidos varían muy poco con la presión, la diferencia entre las condiciones de $p_{\text{normal}} = 1$ bar y $p_{\text{estándar}} = 1$ atm no es detectable experimentalmente, y por ello en la práctica pueden utilizarse los datos tabulados de C_p estándar.

Si en el intervalo de temperatura de interés se verifica una transformación entre distintas formas cristalinas del sólido, la contribución de cada transición sólido-sólido debe incluirse en la ecuación general de la entropía como un término adicional $\Delta S^0_{\text{cristal}} = \frac{\Delta H^0_{T_c,m}}{T_c}$, donde $\Delta H^0_{T_c,m}$ es la variación de entalpía molar de la transición cristalina a la temperatura T_c (Rodríguez Renuncio *et al.*, 2000, p. 100).

Al seguir elevando la temperatura puede tener lugar la fusión del sólido, lo que obliga a introducir un nuevo término correspondiente al cambio de estado: $\Delta S^0 = \Delta H^0_{T_{fusión},m}/T_{fusión}$. Si el estado final de la sustancia es gaseoso, se sumará un término análogo a éste para la vaporización en el punto de ebullición $T_{\text{ebullición}}$. Además, para la sustancia gaseosa debe incluirse un término de corrección mecánico-estadístico que dé cuenta de la diferencia que hay entre la entropía del gas ideal y la del real.

Por ejemplo, la expresión de la variación que experimenta la entropía de una sustancia pura entre el 0 K y el estado gaseoso a una temperatura $T_{f,g}$, teniendo en cuenta una eventual transición cristalina a una temperatura T_c es:

$$S^0_{T_{\mathrm{f,g}}} = \int_0^{T_\mathrm{c}} \left(\frac{\Delta C_p^0(\mathrm{s})}{T}\right) dT + \int_{T_\mathrm{c}}^{T_\mathrm{fus}} \left(\frac{\Delta C_p^0(\mathrm{s})}{T}\right) dT + \frac{\Delta H^0_{T_{fus},m}}{T_{fus}} + \int_{T_\mathrm{fus}}^{T_\mathrm{eb}} \left(\frac{\Delta C_p^0(\mathrm{l})}{T}\right) dT + \frac{\Delta H^0_{T_{eb},m}}{T_{eb}} + \int_{T_\mathrm{eb}}^{T_\mathrm{f,g}} \left(\frac{\Delta C_p^0(\mathrm{g})}{T}\right) dT,$$

siendo $\Delta C_p^0(\mathrm{s})$, $\Delta C_p^0(\mathrm{l})$ y $\Delta C_p^0(\mathrm{g})$, respectivamente, las variaciones de las capacidades caloríficas a presión constante para el estado sólido, el líquido y el gaseoso. Los valores con los subíndices $_c$, $_{fus}$ y $_{eb}$ se corresponden, en cada caso, con la transición cristalina, con la fusión del sólido y con la ebullición del líquido, respectivamente. Por su complejidad, en la ecuación no se ha incluido el término correspondiente a la corrección mecánico-estadística que permite introducir el concepto de gas real.

Una última puntualización sobre la escala de entropías absolutas: la magnitud experimental necesaria para llegar a construir la escala es C_p, que se mide utilizando técnicas de calorimetría adiabática. El principal obstáculo de este método está en la extrapolación de los resultados al cero absoluto, que se considera experimentalmente inalcanzable. Para resolver este problema se aplica la ley cúbica de Debye, que no desarrollaremos. Si la estructura química de la sustancia de interés no es compleja, también se puede calcular su valor de entropía utilizando datos espectroscópicos.

Para terminar, se define la variación de entropía molar normal de reacción $\Delta S^0_{m,T}$ como la variación de entropía implicada en la transformación de los números estequiométricos de los reactivos puros, separados y en sus estados normales a una temperatura T, en los números estequiométricos de los productos puros y separados, cada uno de ellos en su estado normal a la temperatura T. Es decir, en una reacción con coeficientes estequiométricos ν_i, la variación de entropía normal es $S^0_{m,T} = \sum_i \nu_i \cdot \Delta S^0_{m,T}$.

Equilibrio y espontaneidad. La ecuación fundalmental de la Termodinámica y el balance energético total de los procesos

El segundo principio de la Termodinámica permite determinar si un proceso es o no posible en unas condiciones dadas. Según este principio, no son posibles los procesos en los que disminuye la entropía del universo; aquéllos que la hacen aumentar suceden, y además de manera irreversible; y cualquier proceso que no haga variar la entropía universal es posible *a priori*, pero apenas factible en la práctica. La siguiente pregunta es: ¿hasta qué punto es útil el criterio entrópico si se pretende realizar predicciones sobre el equilibrio de los sistemas materiales que experimentan procesos químicos?

Decíamos que la condición de equilibrio en un sistema aislado es que su entropía sea máxima. Para tratar con un sistema cerrado, podemos reducir el problema al de un sistema aislado compuesto por el correspondiente sistema cerrado más su entorno. Entonces la condición de equilibrio es la maximización de la entropía total del sistema más su entorno. Si en el sistema tiene lugar reacciones químicas o transporte de materia entre fases, estos procesos continúan hasta que la entropía del universo alcance su valor máximo, momento en que se cumplirá la condición de equilibrio.

De lo dicho hasta ahora se extrae la idea de que la variación de entropía de cualquier sistema constituye un criterio de espontaneidad y de equilibrio; pero si el

sistema es no aislado, hemos de recurrir al criterio entrópico del universo. Aunque éste es válido, exige conocer las propiedades termodinámicas del entorno y por ello resulta más difícil aplicarlo que buscar una nueva función de estado que nos proporcione un nuevo criterio de equilibrio referido sólo a las propiedades del sistema, evitando el estudio del entorno. Son dos las funciones de estado que sirven para este propósito: la función de Helmholtz *A* (en algunos textos americanos, *F*) y la función de Gibbs *G*.

El equilibrio químico se alcanza generalmente a temperatura y volumen constantes para las reacciones en las que intervienen gases, y a temperatura y presión constantes si las reacciones tienen lugar en disolución líquida. Cada una de las dos nuevas funciones de estado, *A* y *G*, es útil en uno de los dos casos, respectivamente. Para definir *A* y *G*, consideraremos un sistema que se encuentra a una temperatura *T* constante y en equilibrio térmico y mecánico, pero no material; su entorno sí está en equilibrio térmico, mecánico y material. Supongamos que el sistema es cerrado (puede intercambiar energía, pero no materia), y que en él ocurre un proceso a velocidad lo suficientemente pequeña como para mantener el equilibrio térmico y mecánico. Como el proceso es irreversible, $dS_{\text{universo}} > 0$. Con estas premisas establecemos distintas condiciones para llegar a las funciones *A* y *G* (Burgess, 2003).

La función de Helmholtz *A* permite definir la condición de equilibrio en un proceso isotérmico e isocoro:

Si en un sistema cerrado a *T* y *V* constantes se verifica un proceso termodinámico, la combinación de funciones de estado ($U - T \cdot S$), que es a su vez función de estado, disminuye continuamente durante cualquier reacción química espontánea hasta que se alcanza el equilibrio material, punto en el que ($U - T \cdot S$) adquiere su valor mínimo y por tanto $d(U - T \cdot S) = 0$. Un alejamiento espontáneo del equilibrio aumentaría el valor de ($U - T \cdot S$), lo que significaría una disminución en la entropía del universo, y por lo tanto una violación del segundo principio.

La función de estado $A = (U - T \cdot S)$, cuya formulación se debe a H. L. F. von Helmholtz, es una magnitud extensiva que se denomina energía de Helmholtz (*Quantities, units, and symbols in Physical Chemistry*, 1993) o función de Helmholtz. Las denominaciones de *función trabajo* y *energía libre*, que se utilizaron en el pasado, se desaconsejan por su poco rigor científico, puesto que la variación de la energía de Helmholtz *dA* no tiene por qué coincidir con el trabajo realizado: se relaciona con el trabajo total *w* del sistema cerrado en equilibrio térmico y mecánico en una transformación isotérmica e isocora, y por ello $dA \leq w$, dependiendo de si el proceso es reversible ($dA = w$) o irreversible ($dA < w$). A pesar de ello, se ha mantenido el símbolo *A*, que proviene de la antigua denominación *Arbeitsfunktion* (en alemán, función trabajo).

Resumiendo: el criterio de equilibrio material en un sistema capaz de efectuar sólo trabajo *pV* a volumen y temperatura constantes es la minimización de la función de estado energía de Helmholtz *A*.

Para aquellos procesos que alcanzan el equilibrio en condiciones isotérmicas e isobáricas debe definirse otra función de estado, la función de Gibbs o energía de Gibbs:

Si en un sistema cerrado, manteniendo T y p constantes, se verifica un proceso termodinámico, la combinación de funciones de estado ($H - T \cdot S$) disminuye continuamente durante cualquier reacción química espontánea hasta que se alcanza el equilibrio material, punto en el cual ($H - T \cdot S$) adquiere su valor mínimo y por tanto $d(H - T \cdot S) = 0$. Cualquier alejamiento espontáneo del equilibrio aumentaría el valor de ($H - T \cdot S$), lo que significaría una disminución en la entropía del universo, y por lo tanto una violación del segundo principio. La combinación de funciones de estado que verifica estas propiedades es $G = (H - T \cdot S)$, definida por J. W. Gibbs como una función de estado extensiva que se denomina energía de Gibbs o función de Gibbs. Las denominaciones de *entalpía libre*, *energía libre* o *energía libre de Gibbs* (para diferenciarla de la *energía libre de Helmholtz*) se consideran poco rigurosas y por ello se desaconsejan, por razones análogas a las que hemos enunciado para la función A (*Quantities, units, and symbol in Physical Chemistry*, 1993). Sin embargo, enciclopedias técnicas como la *Enciclopedia Salvat de la Ciencia y de la Tecnología* (1964) incluyen el término energía libre para referirse a la energía de Gibbs; en *Handbooks* modernos se refieren a este término como una denominación correspondiente a la literatura antigua (*Handbook of Chemistry and Physics*, 1999-2000). La variación de la energía de Gibbs dG se relaciona con el trabajo w', definido como cualquier trabajo que, distinto al de expansión, realiza el sistema en una transformación isotérmica e isobárica. Así, $dG \leq w'$, dependiendo del proceso: $dG = w'$ en un proceso reversible, y $dG < w'$ en uno irreversible. Por tanto, el máximo trabajo que puede desarrollar un sistema cerrado en condiciones isotérmicas e isobáricas se obtiene cuando el proceso es reversible; para que un proceso real tenga lugar en condiciones de práctica reversibilidad se necesita un dispositivo especial (un reciento de equilibrio de van't Hoff).

El concepto de *energía libre* hace referencia al significado de w', que representa la cantidad de energía útil para hacer avanzar el proceso, esto es, la cantidad de energía que el sistema es capaz de transferir por trabajo, sin tener en cuenta la inevitable expansión en las condiciones isotérmicas e isobáricas. Dos ejemplos de trabajo de no expansión w' en sistemas biológicos son el trabajo de contracción de los músculos y la transmisión de impulsos a través de los nervios.

Establecer una definición concreta del significado de la energía de Gibbs no es tarea fácil, y en el seno de la comunidad científica se ha generado cierta controversia al respecto, sobre todo en lo que respecta al estudio de los sistemas de más de una fase o sistemas complejos, como los sólidos anisotrópicos, en los que ni siquiera parece haber un acuerdo sobre si la función de Gibbs es o no aplicable (Carpenter, 1996).

Para los sistemas que solamente realizan trabajo de expansión, $w' = 0$, y por tanto $dG < 0$. Generalizando para procesos no infinitesimales:

$$\Delta G < 0$$

que es la condición de espontaneidad y equilibrio para un proceso en condiciones isotérmicas e isobáricas.

Si un proceso termodinámico no es isobárico pero tiene lugar a volumen constante, la condición de espontaneidad y equilibrio no viene dada por la función de Gibbs sino por la función de Helmholtz. Si un proceso no tiene lugar en condiciones isotérmicas, en general no disponemos de relaciones matemáticas útiles entre los criterios de Gibbs y Helmholtz, así que debemos remitirnos a la variación de la entropía para estudiar la espontaneidad del proceso y el estado equilibrio que alcanza el sistema (Granville, 1985).

Tanto *A* como *G* tienen unidades de energía (Julios, en el SI).

Resumiendo: el criterio de equilibrio material en un sistema capaz de efectuar sólo trabajo *pV*, a presión y temperatura constantes, es la minimización de la función de estado energía de Gibbs *G*. En una transformación de estas características, el valor de la función *G* va disminuyendo mientras el proceso es espontáneo ($\Delta G < 0$, y la entropía del universo aumenta). Una vez se alcanza el equilibrio, la variación de la energía de Gibbs se anula, y el valor de *G* se mantiene constante en su mínimo posible ($\Delta G = 0$, y *G* es mínimo).

Para cualquier proceso que tenga lugar en condiciones de *T* y *p* constantes, se verifica que, si $\Delta G < 0$, el proceso ocurre de manera espontánea; si $\Delta G > 0$, el proceso espontáneo es precisamente el inverso al propuesto. El caso $\Delta G = 0$ indica que el sistema ha alcanzado el estado de equilibrio y que el proceso se ha detenido a nivel macroscópico. Diversos autores proponen evitar los términos espontáneo / no espontáneo, considerados *engañosos* (Ochs, 1996), y pasar a utilizar los términos exoérgico o exergónico para denominar cualquier proceso que verifique $\Delta G < 0$, y endoérgico o endoergónico para los que se corresponden con $\Delta G > 0$, algunos libros técnicos utilizan esta terminología.

$\Delta G < 0$ es el criterio de espontaneidad y equilibrio más útil en Química, porque la mayoría de las reacciones y cambios de estado ocurren a *T* y *p* constantes. Como G es función de estado, las condiciones de validez del criterio $\Delta G < 0$ se reducen a que los valores de presión y de temperatura sean constantes e iguales en los estados inicial y final, aunque varíen durante el proceso.

En un sistema que alcanza el equilibrio mecánico y térmico al experimentar una reacción química irreversible, la relación entre las dos condiciones de equilibrio que hemos enunciado para *p* y *T* constantes (es decir, la minimización de *G* y la maximización de la entropía del universo) es:

$$\Delta S_{\text{universo}} = -\Delta G_{\text{sistema}} / T$$

Puede demostrarse que la variación de la energía de Gibbs se relaciona con el logaritmo neperiano de la constante de equilibrio a través de la definición de los potenciales químicos para las actividades químicas asociadas y de las fugacidades de los gases reales. En el capítulo 4 del Levine 2002) se recogen todas estas cuestiones relacionadas con los potenciales químicos y los equilibrios materiales (pp. 129 y ss.)

Desde el punto de vista químico y biológico, la relación de la función de Gibbs con las concentraciones de equilibrio es clave para comprender procesos en los que la direccionalidad de la reacción depende de variaciones en las concentraciones relativas de reactivos y productos, como sucede en los procesos metabólicos catalizados por enzimas, que pueden pasar a suceder en uno u otro sentido como respuesta a cambios en las concentraciones de las especies involucradas. El análisis del término entrópico ayuda en estos casos a predecir en qué sentido sucede la reacción, en especial si se introduce el concepto de entropía de mezcla (Gary, 2004) o configuracional: el efecto conjunto de la variación de entalpía y de los términos entrópicos predice la evolución del sistema.

Teniendo en cuenta la expresión de la energía de Gibbs, se puede concretar una ecuación matemática para predecir el sentido de cualquier proceso termodinámico que tenga lugar en condiciones de presión y temperatura constantes. Se trata de la ecuación fundamental de la Termodinámica, que relaciona las variaciones de las variables principales definidas para el sistema, obviando el estudio del entorno:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \qquad \text{Ecuación Fundamental de la Termodinámica}$$

Así pues, la espontaneidad de una reacción química se ve favorecida en las condiciones en las cuales la variación de la entropía del sistema es positiva (en el sentido en el que aumenta el desorden termodinámico del sistema), y también si la variación de entalpía del sistema es negativa (generalmente, si la reacción es exotérmica). Podemos interpretar la ecuación fundamental de la Termodinámica desde el punto de vista de cualquiera de los dos criterios de espontaneidad y equilibrio que hemos definido para T y p constantes, es decir, $\Delta G_{\text{sistema}}$ y $\Delta S_{\text{universo}}$:

Analizando el valor de la variación de energía de Gibbs del sistema, obtenemos que la reacción química es espontánea mientras $\Delta G < 0$ y se detiene cuando $\Delta G = 0$, porque el proceso solamente puede tener lugar en tanto en cuanto el sistema dispone de energía suficiente para producir trabajo útil. Mientras $\Delta G < 0$, el sistema todavía puede transferir al entorno energía por trabajo de no expansión. Esta disponibilidad de energía que transferir, o dispersar, como defiende (Lambert, 2002a), se favorece en las condiciones en las que el sistema puede ceder energía por calor al entorno ($\Delta H < 0$, asimilable a un proceso exotérmico no adiabático), y/o a altas temperaturas termodinámicas (porque las partículas del sistema tienen mayor energía cinética promedio que transferir), así como en aquellos procesos en los cuales el sistema se desordene termodinámicamente ($\Delta S > 0$, hay más estados energéticos disponibles para las partículas). En pocas palabras, las dos tendencias microscópicas que determinan la evolución de un sistema son la minimización de la energía y la maximización de la dispersión energética o desorden termodinámico (Bickford, 1982).

Analizando el valor de la variación de entropía del universo, vemos que la reacción es espontánea mientras $\Delta S_{\text{universo}} > 0$ y se detiene cuando $\Delta S_{\text{universo}} = 0$, porque el proceso solamente puede tener lugar mientras la energía por calor se transfiera por

trabajo. Un proceso exotérmico ($\Delta H < 0$) implica energía que se puede ceder por calor al entorno para aumentar la entropía de éste; si además se produce una variación positiva de la entropía del sistema, en conjunto la entropía del universo aumenta, lo cual indica que el proceso es espontáneo. Las altas temperaturas de reacción también favorecen la dispersión de energía.

El balance energético que se representa mediante la Ecuación Fundamental de la Termodinámica puede resumirse como:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

{E transferible por $w_{útil}$} = {E_{total} transferida por q} – {E disipada por q, a una T}

Desde este punto de vista, la Ecuación Fundamental de la Termodinámica puede visualizarse como un balance total de la energía susceptible de dispersión y, en este sentido, es una ecuación de estado que da cuenta de toda la entropía de la que el sistema dispone para evolucionar (Lambert, 2002a).

El tratamiento algorítmico basado en la ecuación fundamental permite obtener información sobre la estabilidad termodinámica de un compuesto en unas condiciones dadas; así, se puede predecir si la sustancia de interés se descompondrá o no por medio de alguna reacción espontánea. También se puede calcular la temperatura a partir de la cual se hace posible o imposible una reacción determinada. Nótese que la espontaneidad suele definirse como la tendencia natural a que el sistema evolucione sin intervención externa, y debemos matizar esta definición: si un proceso es no espontáneo en unas condiciones dadas, no se hará espontáneo porque se le aplique una intervención externa. Lo que se logra mediante la intervención externa es cambiar las condiciones del sistema hacia otras en las que se verifica la espontaneidad; pero no se puede obligar a un sistema a realizar un proceso no espontáneo.

Por su relación con la extensión de la reacción ξ, la función de Gibbs resulta útil si se pretende conocer detalles sobre el estado de equilibrio de los sistemas químicos y sobre la evolución que éstos experimentan desde un estado inicial de equilibrio cuando sufren alguna perturbación externa. No entraremos aquí en el debate sobre los pros y los contras de la utilización del principio de Le Châtelier para analizar los desplazamientos del equilibrio de un sistema químico, porque esta polémica se sale del tema de la presente Tesis, centrada en la Termoquímica y la Termodinámica Química; en Rocha (2008) se discuten en profundidad los aspectos relacionados con el Equilibrio Químico. Sí destacaremos que varios autores han hecho hincapié en las limitaciones de la regla de Le Châtelier (por ejemplo, Quílez y Solaz, 1994), de formulación ambigua. Pero si las perturbaciones se estudian desde el punto de vista de la variación de la extensión de la reacción ($\Delta\xi$) con la presión y la temperatura, las expresiones que se obtienen son formulaciones matemáticas válidas del principio de Le Châtelier y muestran las condiciones en las que éste se puede aplicar, relacionando las posibles evoluciones de los sistemas con las funciones de Helmholtz y Gibbs. Estas formulaciones tienen especial

utilidad si se pretende estudiar un sistema abierto (Solaz y Quílez, 2001). También se puede relacionar el principio de Le Châtelier con la ecuación de van't Hoff (Thomsen, 2000). Se puede realizar una aproximación microscópica al principio de Le Châtelier en términos de las variaciones en los potenciales químicos del sistema y de las nuevas probabilidades que éste adquiere debido a los efectos de la perturbación sobre el equilibrio inicial, teniendo en cuenta que se va a alcanzar un nuevo estado final de equilibrio que maximizará la entropía total del sistema y alrededores, es decir, del universo (Novak, 2005).

Modificando las expresiones que hemos formulado anteriormente para *U*, *H*, *S*, *A* y *G* mediante el cálculo diferencial, se han enunciado otras expresiones algebraicas que relacionan diversas variables termodinámicas entre sí. Por ejemplo, existen cuatro fórmulas que relacionan las tres variables básicas *T*, *p* y *V*, con *S*, y son las identidades conocidas como relaciones de Maxwell (Price, 1998, p. 52), que se obtuvieron aplicando la diferencial exacta por derivadas segundas a las transformaciones de Legendre de algunas de las funciones termodinámicas. Pero no las trataremos aquí, porque su aplicación a sistemas complejos (por ejemplo, no homogéneos) es muy limitada, y porque además solamente dos de las cuatro relaciones de Maxwell son independientes entre sí.

Como ocurre con las otras variables termodinámicas principales, resulta interesante disponer de datos sobre la energía de Gibbs molar de formación de las sustancias. Para obtenerlos, dado que no se pueden calcular energías de Gibbs absolutas, se establece un convenio que permite obtener una escala relativa de *G*: si se asigna el valor cero a la energía de Gibbs molar normal de cualquier elemento en su estado de agregación más estable, entonces el valor de $G^0_{m,f}$ de un compuesto corresponde a la variación de la energía de Gibbs normal de su formación a partir de los elementos en su estado normal.

Aquí conviene recordar que cualquier elemento en su forma de referencia tiene una entalpía convencional $H^0_{m,f} = \mathbf{0}$, pero una entropía $S^0_{m,f} \neq \mathbf{0}$; entonces $G^0_{m,f} \neq \mathbf{0}$, la energía de Gibbs convencional para un elemento es distinta de cero.

Por este motivo, en lugar de tabular valores relativos de $G^0_{m,f}$, en las tablas se recogen los valores de energías de Gibbs convencionales del estado normal $G^0_{m,T}$ definidas mediante $G^0_{m,T} = H^0_{m,T} + T \cdot S^0_{m,T}$, donde $H^0_{m,T}$ y $S^0_{m,T}$ son, respectivamente, los valores de la entalpía y la entropía convencionales para la sustancia en su estado de referencia en condiciones normales. El proceso tiene que ser isotérmico, o al menos la temperatura ha de ser la misma en los estados inicial y final.

La variación de energía de Gibbs normal $\Delta G^0_{m,T}$ de una reacción química se define como la variación de la energía de Gibbs que resulta al convertir los números estequiométricos (ν_i para cada sustancia *i*) de los reactivos puros y separados, cada uno de ellos en su estado normal a la temperatura *T*, en los productos puros, separados y en sus estados normales a la temperatura *T*. Es decir se define: $G^0_{m,T} = \sum_i \nu_i \cdot \Delta G^0_{m,T}$.

Se han publicado diversas tablas en las que se recogen los datos termodinámicos más relevantes de numerosas sustancias químicas (ver, por ejemplo, Levine, 2002, p. 167, o Jacobson, 2001). Las magnitudes que se reflejan en las tablas son la capacidad calorífica molar a presión constante, la variación de entropía molar de formación, la entropía molar de la sustancia y la variación de la energía de Gibbs molar de formación. Por lo general, los valores de las tablas termodinámicas que datan de antes de 1982 vienen referidos a la presión estándar (1 atm) y a la temperatura de 298 K (temperatura ambiente); las más actuales suelen trabajar con la presión normal de 1 bar y la temperatura ambiente: $C^0_{p,m,298}$, $\Delta H^0_{m,f,298}$, $S^0_{m,298}$ y $\Delta G^0_{m,f,298}$. Las primeras tablas empleaban la unidad de caloría termodinámica, equivalente a 4,184 J (*Handbook of Chemistry and Physics*, 1999-2000). A lo largo de los años se han asignado diferentes valores a la unidad de caloría, y la más empleada es la ingenieril, equivalente a 4,1868 J, que utilizan algunos físicos e ingenieros. En la actualidad se ha adoptado el SI de unidades, así que las tablas expresan los valores en la unidad de energía internacional (*Quantities, units, and symbol in Physical Chemistry*, 1993): el Julio, definido como la cantidad de trabajo que realiza una fuerza de 1 N que actúa en la dirección del movimiento tal que produce un desplazamiento de 1 m. Por ello, 1 J ≡ 1 N·m (*ISO Standard Handbook*, vol. 2, 1992).

Si se trabaja con valores procedentes de distintas tablas termodinámicas es importante asegurarse de que éstas emplean las mismas formas de referencia. Recordemos que existe una excepción a la regla general de que la forma de referencia de una sustancia es la más estable a la presión de 1 bar y la temperatura de interés: para los elementos gaseosos a 1 bar y 298 K, la mayoría de las tablas consideran como estado de referencia el del gas a T < 298 K, aunque en estas condiciones la forma más estable de la sustancia sea un líquido o un sólido.

Antes de operar con valores de distintas tablas, también se debe comprobar que los datos están referenciados para la misma presión. Si las sustancias de interés están en estados condensados, las propiedades termodinámicas apenas varían con la presión, y la diferencia entre 1 atm y 1 bar puede considerarse despreciable. Pero para los gases, si éstos no se comportan como ideales, los valores de las propiedades del sistema sí se ven afectados por la presión. Por ejemplo, el efecto en la entropía molar de un gas ideal por el cambio isotérmico de presión desde 1 atm a 1 bar es la adición de ~0,109 J/(mol K); recordemos que el cambio en la entropía repercute en la variación de la energía de Gibbs.

Si interesa conocer los valores que adoptan las variables termodinámicas principales a temperaturas diferentes de los 298 K, se pueden consultar colecciones de datos que responden a condiciones distintas de las habituales. Algunas tablas proporcionan las desviaciones de los valores termodinámicos en algunos intervalos de temperatura (por ejemplo, $\Delta H^0_{m,f,T} - \Delta H^0_{m,f,298}$). En todo caso, estas diferencias pueden determinarse de manera teórica integrando los valores de $C^0_{p,m}$ en el intervalo de temperaturas considerado. Si se dispone solamente de datos termodinámicos a

temperatura ambiente, también se pueden consultar las colecciones de expresiones polinómicas de $C_{p,m}^{0}$, que también permiten hallar las variaciones de las variables principales a temperaturas alejadas de los 298 K.

Hasta ahora hemos discutido las características de aquellas tablas en las cuales se recogen valores termodinámicos medidos por técnicas calorimétricas. Pero también se han publicado tablas basadas en diversos métodos de la Mecánica Estadística que sirven para calcular de manera más precisa los valores de las propiedades termodinámicas de los gases (ideales) a partir de la estructura atómico-molecular del gas y de datos estructurales como distancias de enlace, ángulos de enlace, frecuencias de vibración…

Existen millones de compuestos químicos, y es evidente que no interesa medir los datos termodinámicos de todos ellos. Lo que sí resulta útil es disponer de métodos rápidos para estimar las propiedades termodinámicas de un compuesto químico sin tener que realizar medidas experimentales.

El método más utilizado para estimar propiedades termodinámicas ya se ha descrito cuando se discutió la entalpía de enlace: consiste en utilizar los valores promedio de las contribuciones de cada tipo de enlace químico a la propiedad en cuestión. Estas contribuciones se suman para obtener el valor de las propiedades correspondientes a la molécula de interés, y de ahí se extrae el valor de la variable termodinámica molar.

La principal desventaja de estos métodos aproximativos basados en la aditividad de las propiedades termodinámicas asociadas a los enlaces químicos, es que en general no pueden aplicarse a sólidos ni líquidos, porque en estos estados la contribución de las fuerzas intermoleculares distorsiona los resultados. Puede optarse por aplicar correcciones a los cálculos, añadiendo los valores asociados a los cambios de estado, utilizando ecuaciones que estiman las fuerzas intermoleculares, etc. También se pueden lograr resultados más precisos si la estimación se genera a partir de una variante del método aditivo, aunque ésta requiere tablas de datos más extensas, porque no suma las contribuciones de los enlaces, sino las de los grupos funcionales presentes en la molécula; así se tienen en cuenta factores estéricos y tensionales, de electronegatividad, resonancia…

Por lo general no se requieren datos muy precisos de las variables termodinámicas y de sus variaciones, así que los investigadores prefieren trabajar con aproximaciones menos precisas pero que se obtienen con menor cantidad de fuentes de información y de manera más rápida.

Un ejemplo claro de estos métodos de aproximación sencillos es la regla de Campbell, muy útil cuando se estudia la influencia que ejercen las características físicas y químicas básicas de las sustancias sobre el valor de la entropía:

Las entropías de los gases son sustancialmente mayores que las de los líquidos, y éstas, algo superiores a las de los sólidos. Además, las sustancias con tamaños moleculares parecidos tienen valores de entropía similares. Por ello, cuando en el proceso

químico solamente se hallan implicados gases, líquidos puros o sólidos puros, la variación de entropía depende sobre todo de la variación en el número de mol del gas $\Delta\nu_{gas}$. Si el estado final está compuesto por un mayor número de mol de gas, entonces $\Delta\nu_{gas} > 0$, y la variación de entropía del sistema también será positiva. Si hay más mol de gas en los reactivos, entonces la reacción verifica $\Delta\nu_{gas} < 0$, y la entropía disminuye. En caso de que no haya diferencia en el número de mol de gas entre los reactivos y los productos ($\Delta\nu_{gas} \approx 0$), entonces la variación de entropía asociada a la reacción rondará el valor cero. Según la regla de Campbell, la variación de entropía asociada a una reacción química aumenta en aproximadamente 140 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ a cada mol de gas que se genera en la reacción, y disminuye en la misma medida a cada mol de gas que se consume (Craig, 2003), siempre y cuando no se vea involucrada la formación o recombinación de iones acuosos, en cuyo caso la estimación se desvía de los valores experimentales. Otra aproximación, la de la regla de Trouton, estima en 90 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ la contribución entrópica de la vaporización de un líquido en el punto de ebullición normal si se produce 1 atm en la presión de vapor.

Incluso ciertos cálculos que requieren mayor precisión omiten algunos términos como las contribuciones entrópicas debidas a la mezcla isotópica o a la degeneración del *spin* nuclear, porque éstos apenas son significativos y tienden a anularse en cualquier proceso. Sí suelen incluirse correcciones que tengan en cuenta la influencia de la masa, la geometría y la simetría molecular en los modos de rotación y vibración, así como las relaciones cruzadas entre la variación de entalpía, la de entropía y la de energía de Gibbs debido a procesos de isomerización o desproporcionación (Watson y Eisenstein, 2002).

Si la reacción objeto de estudio tiene lugar en disolución, las variaciones de entalpía y entropía presentan poca dependencia de la temperatura, a no ser que alguna de las especies sufra un cambio de estado en el intervalo de temperaturas considerado. Aunque los valores de las variables termodinámicas tienden a aumentar con la temperatura, en general el incremento correspondiente a los productos cancela el de los reactivos, de manera que en conjunto las variaciones de entalpía y entropía asociadas a la reacción apenas cambian con la temperatura. Así pues, para calcular las ΔH, ΔS y ΔG asociadas a reacciones que tienen lugar a unos pocos cientos de grados Celsius son válidos los datos de las tablas termodinámicas referidas a 298 K, siempre y cuando no se requiera mucha precisión en los cálculos.

Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje

De los análisis epistémico y curricular se desprende el carácter descriptivo, interpretativo y predictivo del conocimiento científico. Nuestra intención es ayudar al alumnado en la construcción de un conocimiento que destaque por su funcionalidad en la interpretación de los hechos y fenómenos del mundo natural. Desde esta perspectiva, los contenidos que seleccionamos para nuestras propuestas didácticas deben ser (Sánchez y Valcárcel, 1993; Domínguez, 2000):

- aquéllos que sean necesarios para la identificación y descripción del objeto o fenómeno que se estudia,
- aquéllos que permitan interpretarlo,
- y aquéllos que se consideren adecuados para mostrar la utilidad del conocimiento seleccionado mediante su aplicación y transferencia al estudio de fenómenos y a la resolución de problemas.

Cada una de estas tres categorías de los conocimientos deseables se corresponde con un nivel de conocimiento diferente, de tal manera que las tres se disponen en orden de complejidad creciente: primero la identificación, después la interpretación y por último la aplicación (o transferencia a otras situaciones). A la hora de seleccionar los contenidos de las propuestas didácticas, consideramos que es oportuno hacer explícito cuál es la intencionalidad con la que se introducen. Conviene, además, secuenciarlos según este orden de complejidad, y no perder de vista que su desarrollo debe resaltar al máximo el carácter funcional de los aprendizajes y las relaciones CTSA.

Dimensionar el conocimiento de la ciencia escolar utilizando esquemas de razonamiento y acción ayuda a los investigadores a plasmar estas reflexiones en la *praxis* (Domínguez, 2000), porque se hacen explícitos los marcos conceptual y procedimental del conocimiento deseable (que hemos detallado en el análisis del contenido científico), y se pueden manifestar gráficamente las diferencias entre los niveles identificativo, interpretativo y de aplicación. Los conocimientos que se representan en los esquemas de razonamiento y acción representativos de la ciencia escolar ponen especial énfasis en el carácter funcional de los conocimientos científicos, entendido aquél como la capacidad de transferir éstos a otras situaciones. Por ejemplo, en los cinco esquemas de razonamiento que forman el macroesquema de razonamiento ***Termoquímica y Termodinámica Química*** (***ERT***), se ve claramente esta progresión:

En el esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***) predomina el nivel identificativo, y se profundiza en el conocimiento representativo de la ciencia escolar utilizado para describir los sistemas materiales, introduciendo las magnitudes termodinámicas para caracterizar los distintos estados termodinámicos de interés. Mediante las relaciones de ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), más interpretativas, se construyen los significados de las variaciones de las magnitudes termodinámicas, que se utilizan para interpretar los cambios que suceden en los sistemas como consecuencia de los procesos físicos y químicos. En ***ER3***, ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, alternan los niveles identificativo e interpretativo, ya que se introducen los aspectos descriptivos de los procesos que permiten clasificarlos y se ponen de manifiesto sus aspectos dinámicos; con ello también se construye una red de relaciones que permiten aplicar el conocimiento termodinámico a nuevas situaciones, hechos y fenómenos. Los aspectos de aplicación del conocimiento cobran mayor importancia en ***ER4***, ***Dinámica de los procesos químicos***, con la construcción de las tres partes de esta disciplina: la

Termodinámica de los procesos químicos, la Cinética Química y el Equilibrio Químico. Aquí se introducen las entidades teóricas que resumen la Dinámica de los procesos, es decir, los enunciados de las leyes de la Termoquímica y los principios de la Termodinámica, así como las ecuaciones matemáticas que dan cuenta de la conservación y la degradación de la energía. Por su parte, ***ER5*** (***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos***), es el esquema de mayor poder interpretativo y de aplicación del conocimiento, porque introduce las herramientas teóricas más potentes para transferir los constructos de la Termodinámica a la interpretación de cualquier hecho o fenómeno nuevo. En ***ER5*** se utilizan los modelos de partículas, enlace y reacción química para elaborar razonamientos descriptivos, justificativos y predictivos de los cambios que suceden en los sistemas.

Sobre la base de los análisis epistémico y curricular de los contenidos, seleccionamos los que consideramos deseables para nuestras propuestas de enseñanza. Ahora, nuestra intención es poner de manifiesto el conjunto de proposiciones sobre estos contenidos objeto de aprendizaje, y para ello estructuramos este conocimiento deseable de la ciencia escolar en los esquemas de razonamiento y acción referenciales. Para construir un esquema referencial sobre una dimensión dada, se realiza una representación gráfica de la estructura de razonamiento o de acción. En ella se simbolizan los esquemas, los subesquemas y las variables mediante etiquetas, y las relaciones entre los elementos, mediante líneas con nexos rotulados que indican la naturaleza de la relación. Cuando alguno de los elementos aparece en el discurso, en este caso en el de la ciencia escolar, diremos que ha sido activado. Lo mismo haremos cuando se trate de representar en los esquemas idiosincrásicos de los alumnos el conocimiento que éstos manifiestan el su discurso oral o escrito.

En los esquemas de razonamiento y acción referenciales, que se describen a continuación, se hacen explícitos los conceptos y procedimientos útiles en Termoquímica y Termodinámica Química, esto es, el *saber* declarado, el *cómo se sabe* y el *saber hacer* en relación con estas disciplinas científicas. Por ello, los esquemas de conocimiento son útiles a los investigadores para guiar la secuenciación de los contenidos objeto de aprendizaje y para evaluar el conocimiento generado (Domínguez y de Pro Bueno, 2005), infiriendo las rutas de aprendizaje que siguió cada estudiante, porque a través de los esquemas se puede caracterizar su discurso (Domínguez Castiñeiras, Pro, y García-Rodeja, 2003).

Hemos optado por estructurar el conocimiento deseable en cinco esquemas de razonamiento: ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***). También se han diseñado cuatro esquemas de acción: ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica***

Química (***EA4***). Todos estos esquemas representan el referencial del conocimiento deseable, que se pretende que los alumnos alcancen con el aprendizaje.

Los cinco esquemas de razonamiento (***ER***s) articulan un macroesquema de razonamiento que denominamos ***Termoquímica y Termodinámica Química*** (***ERT***), en el cual se hace explícita la estructura global de conocimiento conceptual por la que la Ciencia interpreta los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Por su parte, los cuatro esquemas de acción (***EA***s) se articulan en el macroesquema de acción ***Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EAT***), que representa la estructura de acción mediante la que se integran los conceptos, técnicas y destrezas que se utilizan para resolver cuestiones científicas relacionadas con el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos. En los dos macroesquemas, correspondientes a la estructuración global de los nueve esquemas referenciales, se recogen aquellos aspectos descriptivos de los procesos termodinámicos y aquellas inferencias que consideramos deseable que realicen los alumnos sobre las nueve dimensiones:

Esquema referencial de razonamiento *Sistemas termodinámicos (ER1)*

Representa la estructura de razonamiento deseable sobre la concepción de los sistemas materiales como sistemas termodinámicos, esto es, como conjuntos de partículas que experimentan cambios en aquellas características macroscópicas (funciones, variables o magnitudes termodinámicas) que definen su estado. ***ER1*** (anexo, ***Volumen B***$_2$) define las magnitudes termodinámicas como funciones de estado del sistema, y por lo tanto dimensiona el conocimiento relacionado con dos aspectos: con la descripción de los estados termodinámicos atendiendo a las características del sistema, y con la realización de inferencias para llegar a determinar en qué estado termodinámico se encuentra un sistema, en función de sus propiedades.

ER1 contiene el esquema dominante sistema termodinámico, y establece múltiples relaciones en torno a doce subesquemas: universo, entorno, pared, materia, partículas, condiciones del proceso, estado termodinámico, funciones de estado, composición, magnitudes termodinámicas básicas, magnitudes termodinámicas principales y desorden termodinámico. Se observan cuatro grandes redes de relaciones:

La primera de ellas, situada a la izquierda en la representación esquemática, define el sistema termodinámico como la parte del universo que es objeto de estudio y establece interacciones dentro de él. Incluye la activación del subesquema dominante ***sistema termodinámico***, cuyo significado se establece mediante las relaciones con los subesquemas ***universo***, ***entorno*** y ***pared***. La clasificación del sistema en función de sus interacciones con el entorno viene dada por las variables *sistema abierto*, *sistema cerrado* y *sistema aislado*, en función de que el sistema intercambie ***materia*** y/o *energía* (variable que a su vez adopta los valores de *energía mecánica* y *energía de las partículas*). Se hace explícito que la materia está compuesta por ***partículas***, caracterizadas por la *energía de las partículas*, es decir, por la contribución energética de cada partícula al total de la *energía* del sistema.

Las otras tres redes de relaciones parten de un nodo común: la definición de un ***estado termodinámico*** del sistema que se caracteriza mediante ***funciones de estado***. Cada red concreta un grupo de propiedades del estado del sistema, que de izquierda a derecha se ordenan de menor a mayor potencial descriptivo e interpretativo: ***composición***, ***magnitudes termodinámicas básicas*** y ***magnitudes termodinámicas principales***.

En primer lugar, la ***composición*** adquiere un significado preciso a través de las variables *composición química* y *composición en fases*. Ésta se define por su relación con la variable *estados de agregación*, que puede adoptar los valores de *estado condensado* o *estado gaseoso*, y con esta información caracteriza a los sistemas mediante los valores *sistemas homogéneos* y *sistemas heterogéneos*.

Utilizamos el subesquema ***magnitudes termodinámicas básicas*** para declarar las variables *temperatura*, *presión*, *volumen*, así como la *masa y número de mol*, todas ellas ya conocidas por los alumnos, pero a las que se da ahora sentido como funciones del estado del sistema termodinámico. Se enuncia su dependencia con respecto a la *cantidad de materia* (cuantificada por la *masa* y *número de mol*), razón por la que las ***magnitudes termodinámicas básicas*** puedan adoptar los valores *variables extensivas* o *variables intensivas*. Obsérvese que ***ER1*** da significado a la *temperatura* y la *presión* como características que determinan el estado del sistema; en ***ER2*** se incluirán nuevas relaciones que aportan a estas variables el sentido de parámetros mediante los que se representan las condiciones que el ***entorno*** impone al ***sistema termodinámico***. Con la definición de la *temperatura absoluta* en ***ER1*** se apoya la construcción de relaciones sobre los aspectos microscópicos, que establecen "relaciones frontera" con ***ER5***, como explicaremos en breve.

En torno al subesquema ***magnitudes termodinámicas principales***, se establece una red de relaciones que declara como tales las variables la *energía interna*, la *entalpía*, la *entropía* y la *energía de Gibbs*, y las caracteriza mediante los valores *variables extensivas* o *variables intensivas* según su formulación dependiente o independiente de la *cantidad de materia* (recordemos la diferencia entre el significado de las unidades de J ó J/K, y el de las de J/mol y J/mol·K). También se hace explícita la dependencia entre las ***magnitudes termodinámicas principales*** y dos variables interesantes en Química: la *composición química* y la *temperatura absoluta*.

Por último, existen varias relaciones que no forman parte de grandes redes pero sirven como "relaciones frontera" entre ***ER1*** y los demás esquemas del macroesquema de razonamiento ***ERT***. En concreto, vinculan ***ER1*** con ***ER2*** y ***ER5***, para que el esquema ***Sistemas termodinámicos*** incorpore alguna relación sobre los procesos termodinámicos (***ER2***), sobre la Dinámica de los procesos químicos (***ER4***) y sobre la configuración microscópica del sistema (***ER5***).

Las "relaciones frontera" hacia ***ER2*** se establecen al declarar las ***condiciones del proceso*** como una imposición del entorno que condiciona las interacciones del sistema, y al poner de manifiesto que la *cantidad de materia* de un sistema no varía durante los

procesos químicos. Los subesquemas ***condiciones del proceso*** y ***procesos químicos*** introducen una perspectiva dinamizadora para que desde ***ER1*** se observen las condiciones que hacen posible el cambio de estado termodinámico y la posibilidad de que el sistema evolucione químicamente.

Para construir la perspectiva microscópica mediante relaciones que vinculan ***ER1*** a ***ER5***, se concretan tres vías:

En primer lugar, se establece que cualquier ***sistema termodinámico*** está compuesto por ***partículas***, cuyo atributo es la *energía de las partículas*. En segundo lugar, se declara que cualquier ***estado termodinámico*** se corresponde con varios *micrestados de energía* permitidos por las reglas mecanocuánticas. La tercera vía de relación entre ***ER1*** y ***ER5*** da significado a las ***magnitudes termodinámicas principales*** *energía interna* y *entropía* como las variables que cuantifican, respectivamente, la *energía de las partículas* y el ***desorden termodinámico*** del sistema, cuyo significado se completará en ***ER5***. En esta misma zona del esquema encontramos el vínculo entre ***ER1*** y ***ER4***, relación de dos variables: la *entropía* permite estimar la *probabilidad* de que las partículas del sistema se encuentren en un determinado microestado energético.

Hasta ahora no hemos hecho referencia a las conexiones entre ***ER1*** y ***ER3***, porque representan una transición plena hacia constructos termodinámicos cuya naturaleza ontológica y epistemológica no tiene fácil adaptación a ***ER1***; por ello, las incluimos en ***ER3***. Lo mismo sucede con otras "relaciones frontera" hacia ***ER2***, ***ER4*** y ***ER5***, que se comentan en cada uno de los apartados correspondientes a la descripción de estos esquemas.

Esquema referencial de razonamiento *Procesos termodinámicos (ER2)*

Representa la estructura de razonamiento descriptiva e interpretativa de los procesos físicos y químicos como procesos termodinámicos, es decir, como evoluciones posibles de un sistema material cuyas características físicas y/o químicas experimentan cambios debidos a las interacciones con el entorno (anexo, ***Volumen B_2***). Los cambios se pueden cuantificar mediante las variaciones de las magnitudes termodinámicas, definidas entre dos estados del sistema que se consideran, respectivamente, inicio y final del proceso. Con estas afirmaciones se construye una perspectiva de los procesos termodinámicos que los convierte en eventos interactivos que tienen lugar gracias a las transferencias de materia y energía, que se cuantifican mediante las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales. Las conexiones entre ***ER2*** y ***ER3*** tienden un puente entre los procesos de transferencia energética, calor y trabajo (***ER2***), y ciertas características de los procesos (***ER3***), varias de las cuales se perciben a través de estímulos observables.

ER2 consta de varias redes de relaciones en torno al esquema dominante procesos termodinámicos y los veintisiete subesquemas sistema termodinámico, camino termodinámico, evolución del sistema, sucesión de estados, estados inicial y final, estados

intermedios, pared, transferencias de materia, transferencias de energía, conservación de la energía, degradación de la energía, variaciones de las funciones de estado, variación de temperatura, variación de presión, variación de volumen, variación de energía interna, variación de entalpía, variación de entropía, variación de energía de Gibbs, condiciones del proceso, procesos físicos, cambios de estado de agregación, procesos químicos, disoluciones, reacciones químicas, distribución energética y estabilidad.

La primera de las redes, situada a la izquierda en la representación del esquema, define y caracteriza los ***procesos termodinámicos*** como eventos que suceden en un ***sistema termodinámico*** y se clasifican de acuerdo con dos criterios:

El primer criterio es ya conocido para los alumnos, y por ello decidimos que permanezca implícito en ***ER2***. Se trata del tipo de interacciones que se rompen y forman en el sistema, lo que lleva a clasificar los procesos como ***procesos químicos*** o ***procesos físicos***. Dado que los subesquemas ***formación de interacciones*** y ***ruptura de interacciones*** encajan mejor en ***ER3*** (para dar respaldo teórico a las propiedades de los procesos termodinámicos) y, por supuesto, en ***ER5***, la distinción entre los procesos físicos y los químicos se declara en ***ER2*** solamente desde el dominio macroscópico. De entre los ***procesos físicos***, se trabaja con los más prototípicos, los ***cambios de estado de agregación***, cuyo significado se completa en ***ER2*** atribuyendo a estos procesos la variable *calor latente*, que depende del *calor específico* del sistema (formulable también como capacidad calorífica). Los ***procesos químicos*** se concretan mediante los subesquemas ***disoluciones*** y ***reacciones químicas***. Este último elemento es la base del modelo de reacción química que se desarrolla en ***ER5***, donde ***reacciones químicas*** ejerce de esquema dominante.

El otro criterio que permite clasificar los ***procesos termodinámicos*** se basa en las ***condiciones del proceso***, que se definen mediante las variables *temperatura* y *presión*. Se establecen varios vínculos, en un ciclo por el que se relaciona cada uno de los valores que pueden adoptar los ***procesos termodinámicos*** (*procesos isocóricos*, *procesos isobáricos*, *procesos isotérmicos* y *procesos adiabáticos*) con el correspondiente valor de las ***condiciones del proceso***: *temperatura constante*, *presión constante* o *volumen constante*.

Otra red de relaciones de ***ER2***, muy conectada con la primera, da sentido a los mecanismos que hacen posibles los ***procesos termodinámicos***: las ***transferencias de energía*** y las ***transferencias de materia*** entre el sistema y el entorno a través de la ***pared*** que los delimita. Estas conexiones recuperan los razonamientos que se habían construido en ***ER1*** y los dirigen hacia la definición de las ***transferencias de energía*** mediante las variables *calor* y *trabajo*, cada una de las cuales se vincula a las variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas del sistema que las hacen perceptibles para el observador: el *calor*, con la ***variación de temperatura***, y el *trabajo*, con la ***variación de presión*** y la ***variación de volumen***. El significado del *calor* y el *trabajo* se completa con nuevos atributos que los caracterizan como entidades de la categoría ontológica de procesos: el *calor* se conecta con la variable "*calor latente*" (de los ***cambios de estado de***

agregación) a través del "*calor específico*" / "*capacidad calorífica*", relación que permite poner de manifiesto la naturaleza microscópica del *calor* al entroncarlo con la ***distribución energética*** de las partículas del sistema. La declaración del *trabajo útil* a partir del *trabajo* refuerza la concepción de éste como un proceso macroscópico. Además, se especifica que el *calor* implicado en los ***procesos termodinámicos*** cambia dependiendo de las ***condiciones del proceso***: puede adoptar los valores de *calor a volumen constante* o *calor a presión constante*. En la red de relaciones que se acaba de describir, está implícita la idea de que *calor* y *trabajo*, las ***transferencias de energía***, no son funciones de estado del sistema, y para su cuantificación debe recurrirse a su equivalencia con variaciones de tres de las cuatro magnitudes termodinámicas principales: el *calor a volumen constante* equivale a la ***variación de energía interna***, el *calor a presión constante*, a la ***variación de entalpía***, y el *trabajo útil*, a la ***variación de energía de Gibbs***. La relación de la cuarta magnitud se manifiesta con las limitaciones de las ***transferencias de energía***: la ***conservación de la energía***, y la ***degradación de la energía***, cuya extensión viene indicada por la ***variación de entropía***. Además, se introduce la utilidad de la ***variación de entalpía*** como estimador de la *energía de enlace* químico y del cambio de ***estabilidad*** de las sustancias. Con esto queda completo el significado de las ***transferencias de energía***, y solamente queda por indicar que dependen del ***camino termodinámico***.

Este vínculo abre paso a la tercera red de relaciones de ***ER3***, donde se da sentido a los ***procesos termodinámicos*** como eventos que siguen un recorrido concreto entre estados del sistema. Se expresa la conveniencia de dividir los ***procesos termodinámicos*** en ***etapas*** para estudiarlos, ***etapas*** que no necesariamente coinciden con los distintos pasos del ***camino termodinámico***. El significado del camino se concreta en las relaciones con el subesquema ***sucesión de estados termodinámicos*** y con los valores que puede tomar: *camino abierto* y *camino cerrado*. Se especifica que la ***sucesión de estados termodinámicos*** se realiza entre los ***estados inicial y final*** del sistema, pasando por ***estados intermedios***. Sobre la base de esta estructura de razonamiento, se define que un *proceso cíclico* es un valor asignable a todo proceso en el que coinciden entre sí los ***estados inicial y final***, estableciendo un *camino cerrado*. Si los ***estados inicial y final*** no son el mismo, no estamos ante un *proceso cíclico*.

ER2 tiene varias "relaciones frontera" que lo vinculan a los esquemas de razonamiento ***ER1***, ***ER3*** y ***ER5***.

Ya hemos comentado los vínculos principales de ***ER2*** con ***ER1***, por los que se pone de manifiesto que los ***procesos termodinámicos*** tienen lugar en un ***sistema termodinámico*** y en unas ***condiciones del proceso*** determinadas, especificadas mediante las variables *temperatura* y *presión*. Obsérvese que la relación que convierte un ***sistema termodinámico*** en una entidad material que experimenta ***procesos termodinámicos***, viene representada en el macroesquema de razonamiento ***ERT*** mediante el enlace directo entre los esquemas dominantes de ***ER1*** y ***ER2***. También se hace explícito que es la ***pared*** entre sistema y entorno la que permite las ***transferencias de energía*** y las ***transferencias de***

materia. Por su parte, la relación entre el subesquema ***disoluciones*** y el valor *sistemas homogéneos* refuerza la idea de que en el estudio de los sistemas es interesante caracterizarlos y clasificarlos.

Los esquemas ***ER2*** y ***ER3*** están bastante interrelacionados, porque ambos representan estructuras de razonamiento centradas en los procesos termodinámicos, aunque cada uno los aborda desde una perspectiva diferente. Las conexiones con ***ER3*** incluyen la referencia indirecta a que los ***procesos termodinámicos*** se recorren en un ***sentido del proceso***, que viene dado por el ***camino termodinámico***. También se avanza la utilidad de las ***variaciones de las funciones de estado*** en el estudio de los ***procesos termodinámicos***, aprovechando que, por definición, en cualquier *proceso cíclico* se verifica un valor nulo para todas las ***variaciones de las funciones de estado***. Para reforzar el papel que juegan las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales en el análisis de los aspectos energéticos de los procesos, se han incluido las relaciones que especifican el significado de éstas como cuantificadoras de distintas componentes o aspectos de las transferencias energéticas *calor a volumen constante*, *calor a presión constante*, *degradación de la energía* y *trabajo útil*. De esta manera se refuerza la idea de que los procesos termodinámicos se interpretan a través de los cambios en las propiedades de los sistemas, mediante las variaciones de magnitudes termodinámicas. Además de estas relaciones, indirectas y de carácter más descriptivo, se incluyen otras dos interpretativas, que también hemos comentado: las ***transferencias de energía*** verifican las reglas de ***conservación de la energía*** y ***degradación de la energía***.

No hay muchos vínculos con ***ER5***, porque el esquema ***ER2*** representa una estructura de conocimiento descriptivo e interpretativo, encuadrado en el dominio macroscópico. La concreción de los ***procesos físicos*** como ***cambios de estado de agregación***, y de los ***procesos químicos*** como ***disoluciones*** y ***reacciones químicas***, aproxima los dominios macroscópico y microscópico entre sí; también la relación del "*calor específico*" con la ***distribución energética*** de las partículas del sistema introduce alguna idea de los modelos interpretativos de la Química. Pero en un esquema como ***ER2***, que se centra en describir e interpretar los ***procesos termodinámicos*** sin analizar sus mecanismos causales, consideramos que si se incluyen vínculos hacia el dominio microscópico, se complica innecesariamente la lectura del esquema y se desvirtúa su propósito.

Esquema referencial de razonamiento *Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3)*

Representa la estructura de razonamiento que introduce la perspectiva dinámica necesaria para analizar los procesos desde el punto de vista de la Termodinámica (anexo, ***Volumen B***$_2$). En ***ER3*** se declaran las principales características que mejor enmarcan los procesos en su categoría ontológica. Sobre esta base, se construye una interpretación dinámica que se sostiene en la degradación de la energía, fundamento teórico por el que

se explica la mecánica interna de la evolución de los sistemas materiales. También se hace explícita la estructura de razonamiento mediante la cual se asimilan las características de los procesos a las variaciones de las funciones de estado de los sistemas.

El esquema dominante de ***ER3*** es el mismo que el de ***ER2***: ***procesos termodinámicos***, y se relaciona directa o indirectamente con veinticinco subesquemas: ***balance energético***, ***ruptura de interacciones***, ***formación de interacciones***, ***sentido del proceso***, ***evolución del sistema***, ***rendimiento del proceso***, ***irreversibilidad del proceso***, ***degradación de la energía***, ***espontaneidad del proceso***, ***criterio de espontaneidad***, ***variación de la entalpía del sistema***, ***variación de la entropía del sistema***, ***variación de la entropía del universo***, ***variación de la energía de Gibbs del sistema***, ***equilibrio termodinámico***, ***variaciones de las funciones de estado***, ***variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas***, ***variación de temperatura***, ***variación de presión***, ***variación de volumen***, ***variaciones de las magnitudes termodinámicas principales***, ***variación de energía interna***, ***variación de entalpía***, ***variación de entropía*** y ***variación de energía de Gibbs***. En cuanto a las redes de relaciones más relevantes, la primera representa la estructura de razonamiento sobre el ***balance energético*** de los procesos, y la segunda establece que sólo existe un posible ***sentido del proceso***, que determina la ***evolución del sistema***. A partir de esta relación se establecen dos grandes ramales, uno que vincula dicha evolución con los aspectos dinámicos del proceso (***rendimiento del proceso***, ***irreversibilidad del proceso*** y ***espontaneidad del proceso***) y otro que introduce las ***variaciones de las funciones de estado*** del sistema como las herramientas más útiles en su interpretación.

La primera red de relaciones de ***ER3*** comienza con la clasificación de los ***procesos termodinámicos*** según su ***balance energético***, utilizando los valores *endotermia* y *exotermia*; se explicita que cada uno de estos valores responde a un tipo de cambio en las interacciones del sistema, la ***ruptura de interacciones*** (endotérmica) y la ***formación de interacciones*** (exotérmica).

Describimos ahora el primero de los ramales en que se divide la segunda red de relaciones. Se pone de manifiesto que la Ciencia se vale de las ***variaciones de las funciones de estado*** como las herramientas más adecuadas para interpretar los aspectos dinámicos de los procesos, porque cuantifican distintos aspectos de la ***evolución del sistema***. En una estructura análoga a la que construimos en ***ER1*** para las funciones de estado, aquí se clasifican las ***variaciones de las funciones de estado*** en dos subgrupos, las ***variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas*** y las ***variaciones de las magnitudes termodinámicas principales***. Dado que los alumnos ya están familiarizados con las primeras, consideramos innecesario hacer explícita la relación de la ***variación de temperatura***, la ***variación de presión*** y la ***variación de volumen*** con las correspondientes funciones de estado T, p y V. Pero las ***variaciones de las magnitudes termodinámicas principales*** son conceptos nuevos para los estudiantes, y la literatura en Didáctica de las Ciencias ha revelado varias dificultades de aprendizaje relacionadas con su naturaleza ontológica y epistemológica; por estas razones establecemos un vínculo explícito entre

cada uno de los subesquemas correspondientes (***variación de energía interna***, ***variación de entalpía***, ***variación de entropía*** y ***variación de energía de Gibbs***) y sus respectivas variables (*energía interna*, *entalpía*, *entropía* y *energía de Gibbs*). El significado físico de las variaciones de las magnitudes termodinámicas (básicas y principales) ya se ha representado en ***ER2***, donde se declara qué manifestaciones o transformaciones energéticas cuantifica cada una. En ***ER3*** solamente se incluye una relación que retoma estas ideas, para reforzar la conveniencia de abordar la interpretación de los procesos termodinámicos partiendo de los cambios observados en el sistema. Así, se incluye la utilidad de la ***variación de volumen*** para analizar los cambios en los que el estado de agregación adopta el valor de *estado gaseoso*.

El segundo ramal de relaciones, que parte del subesquema ***evolución del sistema***, representa una estructura de razonamiento de gran poder interpretativo y predictivo, porque da sentido a las propiedades de los procesos que comparten como fundamento teórico la ***degradación de la energía***. Este subesquema es el eje vertebrador que relaciona ***ER3*** con ***ER2*** (también con ***ER4***, en menor extensión) y concentra sobre sí la interpretación dinámica de las reacciones químicas:

La ***evolución del sistema*** cobra un sentido más amplio y preciso por la activación de los subesquemas ***rendimiento del proceso***, ***irreversibilidad del proceso*** y ***espontaneidad del proceso***. Estas tres propiedades de la ***evolución del sistema*** se justifican por el mismo mecanismo causal, que es la ***degradación de la energía***. El hecho de que parte de la energía transferida siempre se disipa por procesos incontrolables de calor en cualquier cambio natural, es lo que determina que todo proceso se detenga en un punto, en el que la transformación nunca se verifica al ciento por ciento (***rendimiento del proceso***); además, la disipación o degradación energética hace que sea altamente improbable que alguna variación en las condiciones revierta el camino termodinámico (en lo que se conoce como ***irreversibilidad del proceso***), y redefine a tiempo real los cambios microscópicos que se van produciendo, por lo que todos los procesos suceden sólo en el sentido de evolución prefijado por las condiciones (***espontaneidad del proceso***).

La ***irreversibilidad del proceso*** genera la clasificación de *procesos reversibles* y *procesos irreversibles*. Entre ambos valores se activa una relación suplementaria para introducir la idea de que los *procesos reversibles* no existen en la naturaleza, sino que son una teorización en la que no se produciría ninguna disipación de energía por calor (ninguna ***degradación de la energía***) y, por tanto, bastaría una modificación infinitesimal de cualquiera de las condiciones para que se recorriera a la inversa el camino termodinámico, estado por estado.

Dado que la ***espontaneidad del proceso*** es, quizá, la propiedad de mayor interés en Termodinámica, conviene que el esquema referencial ***ER3*** recoja una estructura de razonamiento por la que se manifieste la necesidad de utilizar algún ***criterio de espontaneidad*** que ayude a transferir los conocimientos científicos para predecir si un

determinado proceso tendrá lugar o no en unas condiciones dadas. Consideramos interesante explorar si el alumnado reconoce como criterios de espontaneidad inadecuados la ***variación de la entalpía del sistema*** y la ***variación de la entropía del sistema***, y como adecuados la ***variación de la entropía del universo*** y la ***variación de la energía de Gibbs del sistema***, que sirven para indicar la máxima cantidad de *trabajo útil*. Dada la importancia del criterio ***variación de la energía de Gibbs del sistema***, se detalla qué situación predice ésta para un proceso físico o químico según el valor que adopta: situación de proceso *espontáneo* ($\Delta G < 0$), de proceso aparentemente *"detenido"* ($\Delta G = 0$) o de proceso *no espontáneo* ($\Delta G > 0$). Se especifica, además, que la ***evolución del sistema*** se detiene en el estado de ***equilibrio termodinámico***, y que cualquier ***criterio de espontaneidad*** permite evaluar si se ha alcanzado dicho estado. A través de estas dos relaciones se entronca con los razonamientos en torno a los que se contruye ***ER4***.

A continuación resumimos las conexiones que vinculan ***ER3*** con los demás esquemas de razonamiento dentro del macroesquema ***ERT***:

Las "relaciones frontera" con ***ER1*** conectan la *composición química* del sistema a sus mecanismos de cambio, que son la ***ruptura de interacciones*** y la ***formación de interacciones*** entre las partículas (subesquemas comunes a ***ER3*** y ***ER5***). Con ello se comienza a dar forma al centro neurálgico del modelo de reacción química que se pretende desarrollar con las unidades didácticas sobre Termoquímica y Termodinámica Química. Al margen de esto, ya hemos comentado el detalle de la ***variación de volumen*** como herramienta para analizar los cambios en los que se involucra el *estado gaseoso*, y la declaración de las ***variaciones de las magnitudes termodinámicas principales*** como el cambio que experimentan la *energía interna*, *entalpía*, *entropía* y *energía de Gibbs*.

La interrelación de ***ER3*** con ***ER2*** se observa en múltiples relaciones, entre las que destacan la declaración de las ***variaciones de las funciones de estado*** (***variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas*** y ***variaciones de las magnitudes termodinámicas principales***) y la justificación teórica del ***sentido del proceso*** utilizando la ***degradación de la energía*** como fundamento de las características de la ***evolución del sistema***.

Las conexiones con ***ER4*** se realizan a través de dos elementos mediante los que se indica que los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos no se limitan a la Termodinámica, sino que incluyen también aspectos cinéticos y de equilibrio: se adjudica a los procesos la variable *tiempo del proceso*, y se incluye el subesquema ***equilibrio termodinámico*** como el estado en el que se detiene la ***evolución del sistema***; este estado puede predecirse utilizando algún ***criterio de espontaneidad*** válido. Obsérvese que no se ha completado el significado del ***equilibrio termodinámico*** estableciendo un nexo con el valor de proceso *"detenido"* ($\Delta G = 0$), porque el esquema que representa el razonamiento por el que se construyen los aspectos cinéticos y de equilibrio es ***ER4***.

En cuanto a las "relaciones frontera" que unen ***ER3*** y ***ER5***, ya hemos comentado el puente que se establece hacia ***ER1*** a través de los procesos microscópicos de ***ruptura de***

interacciones y ***formación de interacciones*** entre las partículas del sistema. Las relaciones que conectan la ***degradación de la energía*** con los aspectos microscópicos van más allá de ***ER3***, y siguen una ruta que atraviesa el subesquema ***variación de entropía*** y la variable *entropía*, para conectar con los elementos ***desorden termodinámico*** y ***distribución energética*** de las partículas, de ***ER5*** (anexo, ***Volumen B₂***).

Esquema referencial de razonamiento *Dinámica de los procesos químicos (ER4)*

Representa la estructura de razonamiento que da sentido a la Dinámica de los procesos químicos como disciplina científica, así como a las distintas ramas en las que se divide: Termodinámica de los procesos químicos, Cinética Química y Equilibrio Químico (anexo, ***Volumen B₂***). Mediante este esquema se ponen de manifiesto las herramientas teóricas que se utilizan en estos ámbitos científicos para analizar aquellos aspectos que se pusieron de manifiesto en ***ER***3, cuyos fundamentos microscópicos se recogen en ***ER5***. Estas herramientas son los enunciados de las leyes de la Termoquímica y de los principios de la Termodinámica, y las ecuaciones fundamentales de cada una.

El esquema dominante ***Dinámica de los procesos químicos*** se activa mediante su relación con el subesquema ***procesos termodinámicos***. En ***ER4*** se representa una estructura de razonamiento que abarca veintiocho subesquemas: el citado ***procesos termodinámicos***, junto con ***Cinética Química***, ***catálisis***, ***Equilibrio Químico***, ***equilibrio termodinámico***, ***Termodinámica de los procesos químicos***, ***Termoquímica***, ***leyes de la Termoquímica***, ***ley de Lavoisier-Laplace***, ***ley de Hess***, ***ecuación fundamental de la Termoquímica***, ***variación de energía interna***, ***Termodinámica Química***, ***principios de la Termodinámica***, ***principio cero de la Termodinámica***, ***primer principio de la Termodinámica***, ***conservación de la energía***, ***móvil perpetuo de primera especie***, ***segundo principio de la Termodinámica***, ***degradación de la energía***, ***móvil perpetuo de segunda especie***, ***tercer principio de la Termodinámica***, ***desorden termodinámico***, ***ecuación fundamental de la Termodinámica***, ***variación de entalpía***, ***variación de entropía***, ***variación de energía de Gibbs*** y ***Termodinámica Estadística***.

Podemos distinguir tres redes de relaciones dentro de ***ER4***, y cada una de ellas parte de un subesquema que da nombre a una de las disciplinas de la ***Dinámica de los procesos químicos***:

La red sobre ***Cinética Química*** incluye la declaración de la variable *velocidad del proceso*, que adquiere significado gracias a su relación con el *tiempo del proceso*. Para caracterizar la velocidad de las reacciones químicas, se activan las conexiones con los subesquemas ***catálisis*** (que introduce la posibilidad de modificar la velocidad de un proceso químico) y ***equilibrio termodinámico***. Esta última relación pone de manifiesto que la velocidad de un proceso se iguala con la del proceso inverso en un estado del sistema que se denomina ***equilibrio termodinámico***. Al incorporar este subesquema, la red de relaciones sobre ***Cinética Química*** entronca con la del ***Equilibrio Químico***, en la que se representa el estudio del ***equilibrio termodinámico*** mediante los valores *equilibrio*

mecánico, *equilibrio material* y *equilibrio térmico*, y se define el *equilibrio químico* como un caso particular del *equilibrio material*. Para completar la estructura conceptual macroscópica del estado de ***equilibrio termodinámico***, se activa la relación que lo vincula al valor de proceso "*detenido*" ($\Delta G = 0$), en una "relación frontera" que vincula ***ER3*** y ***ER4***.

La red de relaciones sobre ***Termodinámica de los procesos químicos*** comienza con la definición de la ***Termoquímica*** y la ***Termodinámica Química*** como las disciplinas que analizan, respectivamente, los intercambios energéticos entre el sistema y el entorno, y los mecanismos que guían dichos intercambios. El significado de la ***Termoquímica*** se concreta al hacer explícitas las herramientas teóricas que utilizan los científicos en el estudio de las transferencias de energía: las ***leyes de la Termoquímica*** (la ***ley de Laviosier-Laplace*** y la ***ley de Hess***), y la ***ecuación fundamental de la Termoquímica***, en la que se expresa cuantitativamente la ***variación de energía interna*** como el recuento del calor y del trabajo involucrados en el proceso. Hemos optado por no activar una relación directa entre las transferencias de energía y la ***ecuación fundamental de la Termoquímica***, porque ésta no se utiliza para cuantificar el calor y el trabajo, sino el cambio en una propiedad del sistema, en este caso la ***variación de energía interna***. La que sí se halla estableciendo el balance del calor y del trabajo es ΔU, y para ello a su vez hay que medir las variaciones de otras magnitudes termodinámicas: la temperatura, la presión y el volumen; pero estas relaciones se han incluido en ***ER2***. Con esta estructura de razonamiento, que abarca relaciones de ***ER2*** y ***ER4***, se pretende enfatizar en que el estudio energético de los procesos siempre empieza con la observación de los cambios en las funciones de estado del sistema, aunque más adelante convenga conocer también las funciones de la trayectoria. Los fundamentos teóricos de las ***leyes de la Termoquímica*** se encuentran en la ***conservación de la energía***, cuya activación en ***ER4*** conecta este esquema con ***ER3***. El significado del subesquema ***Termodinámica Química*** se desarrolla de manera paralela al de ***Termoquímica***, con el establecimiento de sus herramientas teóricas (los ***principios de la Termodinámica***) y de la ***ecuación fundamental de la Termodinámica***. Los ***principios*** se enuncian sobre los constructos que los justifican: el ***equilibrio térmico*** para el ***principio cero***, la ***conservación de la energía*** para el ***primer principio*** y la ***degradación de la energía*** para el ***segundo principio***, que también se explica sobre la base del ***desorden termodinámico***, al igual que el ***tercer principio***. La introducción del subesquema ***desorden termodinámico*** en ***ER4*** genera una vinculación con ***ER5***. Para completar las afirmaciones de conocimiento sobre las reglas de ***conservación de la energía*** y ***degradación de la energía***, se las presenta como la justificación de la inexistencia, respectivamente, del ***móvil perpetuo de primera especie*** y del ***móvil perpetuo de segunda especie***. En cuanto a la ***ecuación fundamental de la Termodinámica***, se hace explícito que en ella intervienen los subesquemas ***variación de entalpía***, ***variación de entropía*** y ***variación de energía de Gibbs***, así como la variable *temperatura absoluta*.

ER4 presenta vínculos con los demás esquemas de razonamiento, con ***ER2*** y ***ER3*** por un lado, y con ***ER1*** y ***ER5*** por otro:

La conexión directa con ***ER1*** afecta a dos variables que también intervienen en ***ER5***, y que son la *temperatura absoluta* como elemento de la ***ecuación fundamental de la Termodinámica***, y la *probabilidad* como concepto clave en la ***Termodinámica Estadística***. También existe otra vinculación con ***ER5***: al enunciar que el ***desorden termodinámico*** es el fundamento teórico de dos de los ***principios de la Termodinámica*** (segundo y tercero), se abre la puerta a la activación de los modelos microscópicos de representación del conocimiento, con lo que se construyen razonamientos de mayor potencialidad interpretativa. Efectivamente, en la estructura de ***ERT*** se observa que los elementos ***Termodinámica estadística*** y ***probabilidad*** refuerzan los vínculos entre ***ER1***, ***ER4*** y ***ER5***: la ***Termodinámica estadística*** es la parte de la ***Termodinámica Química*** que analiza la *probabilidad* de los microestados energéticos de los sistemas y su evolución a lo largo de los procesos termodinámicos. Así se insiste en que el estudio de los sistemas en evolución (***ER1***) se basa en los modelos de partículas, enlace y reacción química (***ER5***), que son el principal fundamento contemporáneo de la disciplina ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***).

Las "relaciones frontera" que conectan ***ER4*** con ***ER2*** se refieren a las reglas de ***conservación de la energía*** y la ***degradación de la energía***, a las que se dio significado en ***ER2***, y que ahora se presentan como fundamentos de las herramientas teóricas de la ***Termodinámica de los procesos químicos***. Por su parte, las relaciones con ***ER3*** articulan una visión más completa de los aspectos cinéticos y de equilibrio, porque conectan el *tiempo del proceso* con la variable de la ***Cinética Química*** *velocidad del proceso*, y relacionan entre sí dos elementos sobre el ***Equilibrio Químico*** que aparecían separados en ***ER3***: el subesquema ***equilibrio termodinámico*** y el valor de proceso *"detenido" (*$\Delta G = 0$*)*. Con esta relación se completa el significado del ***equilibrio termodinámico*** como el estado en el cual el sistema no tiende a evolucionar en ningún sentido; desde el punto de vista macroscópico, los procesos de ruptura y formación de interacciones no se detienen.

Esquema referencial de razonamiento *Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos (ER5)*

Representa la estructura de razonamiento que integra las principales relaciones teóricas de los modelos microscópicos sobre la estructura corpuscular de la materia, el enlace químico y la reacción química. Por tanto, las relaciones de ***ER5*** no pertencen a la Termodinámica Clásica, aunque son necesarias para justificar o predecir los cambios que experimentan los sistemas materiales. ***ER5*** abarca los tres niveles de conocimiento (identificación, interpretación y transferencia), sobre todo los dos más complejos, y aporta una gran capacidad descriptiva e interpretativa al macroesquema de razonamiento ***Termoquímica y Termodinámica Química***, porque los modelos de la Química microscópica profundizan en los mecanismos responsables de la evolución de los sistemas. Este esquema expresa los razonamientos microscópicos que fundamentan las interpretaciones científicas de la Termodinámica moderna, y por este motivo la estructura de ***ER5*** converge en múltiples relaciones hacia los demás esquemas:

En primer lugar, ***ER5*** permite elaborar razonamientos que respaldan la definición y caracterización macroscópica de las funciones que definen los estados termodinámicos (***ER1***), utilizando el modelo de estructura corpuscular de la materia. En segundo lugar, se establece que las reglas de conservación y degradación de la energía (***ER3***), vinculadas a las transferencias de energía calor y trabajo (***ER2***), son el motor microscópico que promueve la evolución de los sistemas mediante cambios en las interacciones químicas (modelo de enlace quimico), lo que hace posible los procesos, físicos o químicos (modelo de reacción química). Las propiedades de los procesos termodinámicos (espontaneidad, reversibilidad, etc., estructuradas en ***ER3***) encuentran justificación en el concepto microscópico de desorden termodinámico. Por último, se declara que las contribuciones teóricas contemporáneas más destacadas en el estudio de la Dinámica de los procesos físicos y químicos (***ER4***) son varios constructos del dominio microscópico de representación del conocimiento, en concreto los niveles de energía y los microestados energéticos del sistema, mediante los cuales se sistematiza el estudio de la distribución energética de las partículas.

No es fácil concretar en ***ER5*** distintas redes de relaciones que delimiten los modelos de partículas, enlace químico y reacción química, porque las estructuras de razonamiento que contiene el esquema están muy interrelacionadas. Como se explica en el apartado sobre la construcción del macroesquema ***ERT*** (anexo, ***Volumen B₂***), los tres modelos microscópicos se ordenan de izquierda a derecha siguiendo el orden ontológico materia-estados mentales-procesos, pero las transiciones que progresan hacia la siguiente categoría ontológica no presentan soluciones de continuidad precisas, como se puede comprobar observando la localización de los subesquemas correspondientes a las entidades que dan nombre a los modelos (***partículas***, ***interacciones entre partículas*** y ***reacciones químicas***). En ***ER5*** se activan once subesquemas: ***partículas***, ***interacciones entre partículas***, ***disoluciones***, ***reacciones químicas***, ***colisiones entre partículas***, ***distribución espacial***, ***distribución energética***, ***ruptura de interacciones***, ***formación de interacciones***, ***estabilidad*** y ***desorden termodinámico***.

Recordemos que en ***ER1*** se incluye una relación que inicia el modelo de partículas que se pretende construir en ***ER5***: las ***partículas*** tienen *energía de las partículas*. Con esta afirmación sobre la estructura microscópica de los sistemas, se activa el modelo de estructura corpuscular, que contiene pocas relaciones, pero de alto nivel de abstracción: las ***partículas*** establecen ***interacciones entre partículas*** y sufren ***desorden termodinámico***, y la *energía de las partículas* es un criterio para establecer los *microestados de energía*, cada uno de los cuales tiene asociada una determinada *probabilidad*. A partir de aquí, el modelo progresa desde la categoría ontológica de materia hasta la de procesos, apoyándose en variables que definen estados mentales, con lo que se construye un modelo de enlace que entronca con el de reacción química.

El modelo de enlace se activa con la relación entre los subesquemas ***partículas*** e ***interacciones entre partículas***. Se establece que son las interacciones las que determinan

qué *niveles de energía* están permitidos en unas condiciones dadas. Los *niveles de energía* concretan la ***distribución energética*** de las partículas, y por lo tanto fijan los *microestados de energía* posibles para el sistema. Con la activación de estas relaciones, se obtiene una perspectiva dinámica de los sistemas materiales como entidades compuestas por partículas microscópicas que se encuentran en continuo movimiento de acuerdo con la energía que tienen en cada estado. La *energía de las partículas* está organizada en una serie de niveles permitidos que rigen las interacciones con las partículas vecinas. Obsérvese que la ***distribución energética*** también está vinculada con el subesquema superior de ***colisiones entre partículas***, y no hemos comentado todavía qué supone la activación de esta relación. En la red que acabamos de establecer, los elementos ***interacciones entre partículas***, *niveles de energía*, *microestados de energía* y ***distribución energética*** de las partículas se articulan en un modelo de enlace que puede progresar hacia un modelo de reacción química, pasando por dos vías distintas, una de las cuales implicará la activación del subesquema superior ***colisiones entre partículas***:

La primera de las vías que relacionan los modelos de enlace y reacción química es conocida para el alumnado, y desarrolla las dos variables principales que caracterizan las ***interacciones entre partículas***: la *distancia de enlace*, y la *fuerza de enlace*, que se relaciona directamente con la ***estabilidad*** del sistema. En un proceso termodinámico, el sistema gana o pierde ***estabilidad*** debido a los cambios en las interacciones químicas, representados mediante los subesquemas ***ruptura de interacciones*** y ***formación de interacciones***. Esto permite reconstruir las ***reacciones químicas*** como procesos termodinámicos que suponen una modificación de las ***interacciones entre partículas***, con dos implicaciones: un cambio en la ***estabilidad*** (***ER5***) y un balance energético asociado (endotermia y exotermia, ***ER3***).

La segunda vía que relaciona las ***interacciones entre partículas*** y las ***reacciones químicas*** es más abstracta e introduce un modelo mecanocuántico: como ya hemos visto, las ***interacciones entre partículas*** determinan los ***niveles de energía*** entre los que se plasma la ***distribución energética*** característica de cada ***microestado del sistema***. Ahora se introducen los aspectos dinámicos de los procesos químicos, poniendo de manifiesto cuál es el motor que impulsa los cambios en la ***distribución energética***: las ***colisiones entre partículas***, que también producen cambios en la ***distribución espacial*** de las mismas. Se declara que esta ***distribución espacial*** es una consecuencia directa de la ***distribución energética*** (la energía de una partícula se manifiesta en sus movimientos translacionales, vibracionales y rotacionales). Para completar el papel de las distribuciones energética y espacial en el estado termodinámico, se especifica que son diferentes en los distintos *estados de agregación* y que dependen de la *composición química*.

Los procesos termodinámicos en los que cambia la naturaleza química de los sistemas, esto es, las ***disoluciones*** y las ***reacciones químicas***, ya se pueden conceptualizar desde el punto de vista de su mecanismo microscópico: tienen lugar porque se realiza un gran número de ***colisiones entre partículas***, lo que lleva a la evolución macroscópica del

sistema. En ***ER3*** se precisaba que el sentido de esta evolución viene determinado por la degradación de la energía que se verifican en las transferencias de energía entre el sistema y su entorno. En ***ER5*** se indica que su causa última viene representada por el concepto microscópico de ***desorden termodinámico***. Con este subesquema se cierra la red de relaciones mediante la que se da cuenta de los aspectos mecanísticos de los procesos, red que se extiende a ***ER2***, ***ER3*** y ***ER5***.

El subesquema ***desorden termodinámico*** se vincula indirectamente a los *niveles de energía* permitidos para el sistema a través de la ***distribución energética***: el ***desorden termodinámico*** que se observa en las partículas no consiste en una disposición caótica de las partículas en el espacio, sino en una desorganización energética (y, por lo tanto, también espacial) en la distribuciones posibles de éstas entre los *niveles de energía*. En este sentido, el ***desorden termodinámico*** define el estado microscópico de las partículas (*microestados de energía*) y, con ello, el estado termodinámico del sistema en su conjunto. Ésta es una red de razonamientos que une ***ER5*** y ***ER1***, a través de dos vías que conectan los *microestados de energía* con los aspectos macroscópicos: todo estado termodinámico se corresponde con ciertos *microestados de energía*, y éstos se determinan mediante la variable *energía de las partículas*, que es un valor posible de la energía (propiedad del sistema).

La concepción de las reacciones químicas como procesos termodinámicos se completa con las relaciones mediante las que se declaran las variables *energía de enlace* (cantidad de energía necesaria para realizar la ***ruptura de interacciones***) y *energía de activación* (cantidad de energía necesaria para comenzar las ***reacciones químicas***). El ***desorden termodinámico*** se define formalmente en relación con el *cero absoluto*, valor a partir del que se construye la escala de la variable *temperatura absoluta*. Así se refuerza la concepción dinámica de los estados del sistema: desde el punto de vista macroscópico (***ER1***), los estados termodinámicos del sistema son aparentemente estáticos y están caracterizados por variables que adoptan valores fijos (por ejemplo, la temperatura); desde la perspectiva microscópica, los estados son dinámicos, porque las ***partículas*** constituyentes del sistema sufren un ***desorden termodinámico***, que depende de la cantidad de energía cinética promedio de las partículas (*temperatura absoluta*). La relación entre la variable temperatura (macroscópica) y su formulación microscópica como *temperatura absoluta* establece un vínculo entre ***ER1*** y ***ER5*** que pone de manifiesto el dinamismo de los estados del sistema y la extraordinaria potencialidad interpretativa de los modelos microscópicos de representación del conocimiento.

Dado que ***ER5*** representa los razonamientos microscópicos que fundamentan todas las interpretaciones científicas de la Termodinámica moderna, sus "relaciones frontera" llegan a todos los demás esquemas de razonamiento de ***ERT***. Ya se han indicado los principales vínculos con ***ER1***: las ***partículas*** son los constituyentes microscópicos de los sistemas, la *energía de las partículas* es la variable que a nivel microscópico representa la energía del sistema, y se atribuye una serie de distribuciones energéticas y espaciales posibles a cada estado del sistema, estado representado por una *composición química* y un

estado de agregación dados, junto con una *temperatura absoluta* que determina el ***desorden termodinámico***. La *composición química* de los sistemas cambia mediante la ***ruptura de interacciones*** y ***formación de interacciones***, subesquemas a los que ***ER5*** da sentido como procesos microscópicos de las reacciones químicas.

Las relaciones con ***ER2*** son inmediatas: las ***disoluciones*** y las ***reacciones químicas*** son los dos tipos más destacables de procesos químicos que existen. Además, se relacionan dos variables y un subesquema que intervienen en ***ER2*** con subesquemas de ***ER5***: el "calor específico" / "capacidad calorífica" se vincula a la ***distribución energética*** de las partículas del sistema, y la *energía de enlace* y la ***estabilidad*** (ambos elementos relacionados con la variación de entalpía) se asocian a la ***ruptura de interacciones*** y la ***formación de interacciones***. Con estos razonamientos se elabora una interpretación microscópica más refinada de la variación de entalpía, que se completa al vincular ***ER3***.

ER3 es el esquema que contiene los razonamientos necesarios para construir una perspectiva dinámica macroscópica de los procesos, y la conexión más directa con los aspectos microscópicos es evidente, para una de las propiedades de los procesos: el balance energético (macroscópico) se cuantifica mediante la variación de entalpía, y se puede resolver en exotermia o endotermia. La exotermia se debe a la ***formación de interacciones*** estables y la endotermia, a la ***ruptura de interacciones***. La justificación microscópica de las demás propiedades de un proceso termodinámico (sentido, rendimiento, irreversiblidad, espontaneidad, etc.) se realiza a través de la compleja de red de relaciones basada en la degradación de la energía.

Los vínculos de ***ER5*** con ***ER4*** ponen de manifiesto el gran impulso que ha dado la aplicación de los modelos microscópicos al desarrollo de la Termodinámica contemporánea, cuyo *corpus* teórico clásico se ha ampliado gracias a los aspectos mecanocuánticos y estadísticos. Dos de las conexiones entre ***ER5*** y ***ER4*** se establecen a través del subesquema ***desorden termodinámico***, que se declara como fundamento teórico de los principios segundo y tercero de la Termodinámica y depende de la *temperatura absoluta*, variable que interviene en la ecuación fundamental de la Termodinámica. La otra "relación frontera" se relaciona con la *probabilidad*, que cuantifica la posibilidad de que el sistema se encuentre en cualquiera de los *microestados de energía* permitidos. La *probabilidad* es la principal variable de la Termodinámica estadística, disciplina que ha tenido un desarrollo notable durante las últimas décadas gracias a los avances experimentados en el campo de la Mecánica Cuántica.

Macroesquema referencial de razonamiento *Termoquímica y Termodinámica Química (ERT)*

Termoquímica y Termodinámica Química es el macroesquema que articula los razonamientos representados en ***ER1***, ***ER2***, ***ER3***, ***ER4*** y ***ER5***. Con ***ERT*** se hace explícita la estructura general de razonamiento por la que la Ciencia interpreta los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Las estructuras de razonamiento representadas mediante los cinco ***ERs*** referenciales se conectan entre sí según se recoge en la *Figura 9*. Las relaciones descriptivas se simbolizan mediante flechas arqueadas de color verde; las relaciones interpretativas, con flechas rectas y rojas; la construcción de nuevas afirmaciones que permiten progresar hacia otros conocimientos estrechamente relacionados, se simboliza con flechas curvas de color ámbar. Recordemos que ***ER1*** incluye la descripción de un sistema material utilizando las propiedades que definen el estado termodinámico. Es un esquema estrechamente vinculado a otros dos: ***ER5***, que aporta una perspectiva microscópica para los constructos de ***ER1***, y ***ER2***, en el que se construye el significado de los procesos como eventos dinámicos caracterizados por la sucesión de estados del sistema desde un estado inicial hasta un estado final, lo que implica cambios en las funciones de estado debido a las transferencias de materia y/o energía con el entorno. Esto explica que ***ER2***, por su parte, establezca bastantes relaciones con ***ER3***, porque éste es el esquema mediante el que se introducen los razonamientos sobre aquellas características que ponen de manifiesto los aspectos dinámicos de los procesos, partiendo de las reglas que se verifican en las transferencias de energía: la conservación y la degradación. La interpretación microscópica de las relaciones de ***ER3*** se encuentra en sus vínculos con ***ER5***. Por último, el esquema que se observa a la derecha en ***ERT*** es ***ER4***. En él se enumeran las herramientas que se utilizan en las distintas disciplinas de la Dinámica de los procesos químicos. Estas herramientas son de tipo macroscópico (de ahí las conexiones con ***ER3***) y tienen su fundamento en los conocimientos del dominio microscópico que se representan en ***ER5***.

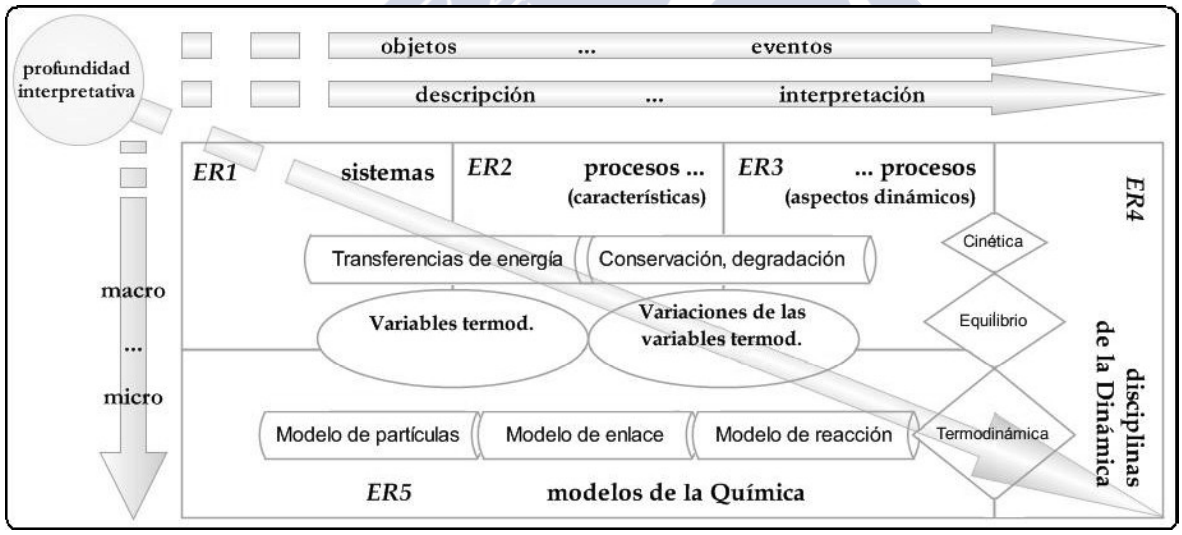


*Figura 9: distribución de las conexiones entre los esquemas **ER1**, **ER2**, **ER3**, **ER4** y **ER5** en el macroesquema de razonamiento **ERT***

En la estructura de ***ERT***, las relaciones entre los elementos del esquema se organizan de arriba abajo en dos grandes bloques: en la región superior se encuentran las relaciones encuadradas en el dominio macroscópico de representación del conocimiento, y en la región inferior se agrupan las que pertenecen al dominio microscópico. Los elementos de ***ERT*** siguen este mismo patrón: dentro de cada bloque, los subesquemas, las

variables y los valores situados en la parte superior son "más macroscópicos" o "menos microscópicos" que los que se encuentran por debajo de ellos. Así, al construir razonamientos que descienden hacia la parte baja del macroesquema se alcanza una mayor profundidad interpretativa gracias a los modelos microscópicos de estructura, enlace y reacción química. Los movimientos verticales ascendentes en ***ERT*** guían los razonamientos hacia el dominio macroscópico, y permiten explicar, justificar y predecir, sobre la base de los modelos de la Química, cuáles son las características observables de los sistemas y procesos termodinámicos.

De derecha a izquierda, se aprecia una progresión ontológica en los elementos del macroesquema, y una progresión epistémica en las relaciones que vinculan los subesquemas, las variables y los valores:

En cuanto a las operaciones epistémicas que se requieren para activar los elementos del esquema, las relaciones situadas a la izquierda tienen un perfil identificativo y descriptivo, mientras que las de la derecha son más interpretativas, y permiten elaborar explicaciones, justificaciones y predicciones cada vez más complejas. Paralelamente, se observa que la naturaleza ontológica de los constructos científicos progresa desde la categoría de objetos hacia la de eventos, a través de relaciones sobre propiedades que permiten definir estados.

Resumiendo, según se avanza de arriba abajo en la estructura del macroesquema ***ERT***, crece el nivel de abstracción de las relaciones establecidas y se produce una mayor integración de los dominios de representación macroscópico y microscópico del conocimiento. Los desplazamientos horizontales, en orden de lectura, muestran unas relaciones cada vez menos descriptivas y más interpretativas, a medida que los elementos del macroesquema se asignan a estados y procesos más que a objetos.

El papel de las magnitudes termodinámicas y de sus variaciones en la interpretación de los procesos termodinámicos se resume de la siguiente manera y aparece representada también en el croquis de la *Figura 9* (pág. 399), que reproduce las características ontológicas y epistemológicas de las estructuras de razonamiento del macroesquema ***Termoquímica y Termodinámica Química***:

Las magnitudes termodinámicas son propiedades del sistema que definen el estado termodinámico, y dependen de las interacciones con el entorno. Se abandona un estado termodinámico cuando varían las magnitudes termodinámicas asociadas a él, y midiendo dichas variaciones se cuantifican los cambios que experimenta el sistema.

Las variaciones de las magnitudes termodinámicas están relacionadas con las transferencias de energía sistema-entorno, y por ello sirven como herramienta para estudiar los aspectos dinámicos de los procesos. Los significados de las distintas magnitudes termodinámicas tienden un puente entre las propiedades observables de los sistemas y la estructura química de los mismos, que fija el estado termodinámico y se interpreta mediante los modelos de partículas y enlace. Por su parte, las variaciones de las

magnitudes termodinámicas principales relacionan entre sí la evolución observable del sistema y los modelos de enlace y reacción química que sirven para explicar y justificar dicha evolución.

Ayudándonos de estas características ontológicas y epistémicas del macroesquema ***ERT***, la lectura en vertical permite visualizar hasta qué punto se produce una integración de los dominios macroscópico y microscópico de representación del conocimiento, y cómo gracias a esta integración se construyen razonamientos de mayor profundidad descriptiva e interpretativa. La lectura en horizontal ayuda a estimar la progresión creciente de la profundidad interpretativa de los razonamientos, desde el extremo superior izquierdo del esquema hacia el extremo inferior derecho, correspondiéndose con la confluencia en el desarrollo de una visión dinámica de los procesos físicos y químicos (en dirección a ***ER3*** y ***ER4***) y el desarrollo de los modelos de enlace y reacción química (hacia ***ER5***). Ésta es la razón por la que hemos incluido ***ER5*** en el macroesquema de razonamiento ***Termoquímica y Termodinámica Química***: las relaciones de ***ER5*** no pertenecen a la Termodinámica Clásica, pero sobre su estructura convergen las relaciones de los demás esquemas, aportando la profundidad interpretativa que se pretende que alcancen los alumnos con el aprendizaje.

A continuación se describen los cuatro esquemas de acción referenciales que se han diseñado: Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos (***EA1***), Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (***EA2***), Representación gráfica de aspectos termodinámicos (***EA3***) y Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química (***EA4***), junto con el macroesquema de acción Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química (EAT), que representa la estructura de acción en la que se integran los conceptos, técnicas y destrezas que se utilizan para resolver cuestiones científicas relacionadas con el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos.

Esquema referencial de acción *Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos (EA1)*

Representa la estructura de acción deseable sobre el papel del reconocimiento, el control y la exclusión de las magnitudes termodinámicas en la identificación y descripción de los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos (anexo, ***Volumen B$_2$***). Se ponen de manifiesto los distintos tipos de dependencia entre magnitudes y se establecen los significados de las leyes de la Termoquímica y de los principios de la Termodinámica en relación con las transferencias de energía y con las variaciones de las magnitudes termodinámicas que las cuantifican.

EA1 contiene el esquema dominante análisis de los procesos termodinámicos, y establece múltiples conexiones en torno a doce subesquemas: identificación y descripción de aspectos termodinámicos, estudio de las magnitudes termodinámicas, reconocimiento de las magnitudes termodinámicas, control y exclusión de las magnitudes

termodinámicas, interpretación de aspectos termodinámicos, establecimiento de significados, leyes de la Termoquímica, principios de la Termodinámica, dependencias de las magnitudes termodinámicas, relaciones proporcionales, relaciones contributivas y contraste de hipótesis. Se observan dos grandes redes de relaciones, que corresponden a dos de las tres acciones fundamentales en el análisis de los procesos termodinámicos: la identificación y descripción de aspectos termodinámicos y la interpretación de aspectos termodinámicos. Debido a su complejidad estructural, la tercera acción, que es la representación de aspectos termodinámicos, se desarrolla entre los esquemas ***EA2*** y ***EA3***.

Antes de comenzar a describir las dos grandes redes de relaciones, destacamos un vínculo que refuerza la naturaleza ontológica del ***Análisis de los procesos termodinámicos***: éste se centra en los ***procesos termodinámicos*** en sí, no en el estudio de estados aislados de los ***sistemas termodinámicos***.

Para identificar y describir los procesos desde el punto de vista de la Termodinámica, es necesario identificar primero el ***sistema termodinámico*** y el ***proceso termodinámico*** que tiene lugar. Para ello se recurre al ***estudio de las magnitudes termodinámicas***, lo que implica dos acciones:

En primer lugar, se necesita un ***reconocimiento de las magnitudes termodinámicas***, esto es, de las variables *temperatura*, *presión*, *volumen*, *energía interna*, *entalpía*, *entropía* y *energía de Gibbs*. En segundo lugar, se indaga en los cambios que tienen lugar como consecuencia del proceso, mediante el ***control y exclusión de las magnitudes termodinámicas***, cuya finalidad es distinguir cuáles de las variaciones de las funciones de estado interesan en cada caso concreto, de entre las variables *variación de temperatura*, *variación de presión*, *variación de volumen*, *variación de energía interna*, *variación de entalpía*, *variación de entropía* y *variación de energía de Gibbs*. El ***control y exclusión de las magnitudes termodinámicas*** no se detiene en el rastreo de las variaciones de las funciones de estado, sino que abarca también el análisis de las ***dependencias de las magnitudes termodinámicas***. Los significados concretos de las dependencias entre magnitudes se establecieron en los esquemas de razonamiento y no tienen cabida aquí. Las acciones que interesa activar se refieren a la caracterización de los tipos de dependencia: las ***relaciones proporcionales*** y las ***relaciones contributivas***. Entre las primeras, se definen las *relaciones directas* como aquéllas que relacionan dos magnitudes cuyas cantidades aumentan o disminuyen a la par. Las *relaciones inversas* son aquéllas en las que el aumento en la cantidad de una de las magnitudes implica la disminución de la otra. La única *relación inversa* interesante en Termodinámica es la que se establece entre la *presión* y el *volumen*, mientras que encontramos bastantes *relaciones directas* destacables, y en la mayoría de ellas se involucra la *temperatura*. En ***EA1*** no las desarrollamos para no complicar innecesariamente la lectura del esquema, porque basta con que los alumnos consideren la *temperatura* como una variable cuyo aumento conlleva un aumento de cualquiera de estas variables: la *presión*, el *volumen* del sistema (dependiendo de la naturaleza y propiedades de la pared), la energía interna y la entropía, y el calor y el trabajo involucrados. En las

relaciones contributivas, las magnitudes establecen combinaciones lineales entre sí. Éste es el caso del *calor* y el *trabajo*, cuya suma es igual a la *variación de energía interna*; o el de la *variación de entalpía*, que se combina linealmente con la *variación de entropía* (multiplicada por la *temperatura*) para dar la *variación de energía de Gibbs*.

La segunda red de relaciones que se activa en ***EA1*** tiene su origen en el subesquema ***interpretación de aspectos termodinámicos***, cuyo éxito de activación depende en buena medida de la adecuada ***identificación y descripción de aspectos termodinámicos***. Para explicar, justificar o predecir los cambios energéticos relacionados con un proceso, se hace necesario un ***establecimiento de significados***, al menos para aquellos contructos teóricos que aportan más potencialidad interpretativa a los razonamientos. Los significados que interesa establecer son los de las ***leyes de la Termoquímica***, los de los ***principios de la Termodinámica*** y los relacionados con el ***control y exclusión de las magnitudes termodinámicas***. Las ***leyes de la Termoquímica*** permiten utilizar combinaciones lineales de los datos de *variación de entalpía*, mientras que los ***principios de la Termodinámica*** se relacionan con la *variación de la entropía* y con las transferencias energéticas, *calor* y *trabajo*. Solamente queda por declarar el propósito con que se lleva a cabo la ***interpretación de aspectos termodinámicos***: para realizar el ***contraste de hipótesis*** sobre el conocimiento, acción hacia la que se encaminan todas las destrezas y estrategias que se ponen en juego en el ***análisis de los procesos termodinámicos***.

EA1 es el esquema de acción más básico y sencillo del macroesquema ***EAT***, y en él predomina el nivel identificativo del conocimiento. Se establecen "relaciones frontera" con ***EA2***, ***EA3*** y ***EA4***, pero dado que estos vínculos permiten desarrollar aspectos de los demás esquemas de acción a partir de ***EA1***, los comentaremos en los apartados siguientes. Las relaciones con ***EA2*** (***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***) y ***EA3*** (***Representación gráfica de aspectos termodinámicos***) son más o menos paralelas, en el sentido de que modelan mediante representaciones de distintos tipos (léxicas, icónicas, algebraicas y gráficas) las descripciones e interpretaciones basadas en las magnitudes termodinámicas y en sus variaciones. Los puentes de unión con ***EA4*** (***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química***) ponen de relieve la idea de que las variaciones de las magnitudes termodinámicas son la principal herramienta en la resolución de problemas, desde la etapa de emisión de las hipótesis hasta el contraste de las mismas.

Esquema referencial de acción *Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)*

Ilustra la estructura de acción representativa de las destrezas y estrategias que se ponen en juego para representar de manera léxica, icónica y algebraica los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos (anexo, ***Volumen B_2***). Con las acciones de ***EA2*** se construyen representaciones que apoyan los razonamientos sobre los procesos

termodinámicos (***EA1***), y se facilita la realización de inferencias útiles en la resolución de problemas en Termodinámica (***EA4***). Existe un tipo de representación del conocimiento termodinámico que no se recoge en ***EA2***: las representaciones gráficas, cuya estructura de acción se muestra en ***EA3***. Tanto en ***EA2*** como en ***EA3***, predomina el nivel interpretativo del conocimiento científico; además, la activación de las relaciones en vertical hacia abajo hace posible una mayor transferencia de conocimiento.

El esquema dominante de ***EA2*** es el mismo que el de ***EA1*** y ***EA4***: ***análisis de los procesos termodinámicos***. ***EA3*** tiene un esquema dominante de menor jerarquía, porque no pasa de ser una gran ramificación de ***EA2*** cuya complejidad estructural y novedad para el alumnado requiere la activación de tantas relaciones que hemos decidido incluirlas en un nuevo esquema de acción. ***EA2*** contiene catorce subesquemas: ***identificación y descripción de aspectos termodinámicos***, ***interpretación de aspectos termodinámicos***, ***representación de aspectos termodinámicos***, ***léxico científico***, ***convenios***, ***representaciones icónicas***, ***desorden termodinámico***, ***contribución personal***, ***representaciones algebraicas***, ***consistencia en la simbología***, ***escalas de medida***, ***estequiometría***, ***criterios de decisión*** y ***criterios termodinámicos de decisión***.

La estructura de ***EA2*** relaciona el esquema dominante ***análisis de los procesos termodinámicos*** con el subesquema ***representación de aspectos termodinámicos***, al cual define como una acción fundamental que apoya la ***interpretación de aspectos termodinámicos***, realizada la ***identificación y descripción de aspectos termodinámicos***.

Se declaran entonces tres de los cuatro tipos de representaciones útiles en Termoquímica y Termodinámica Química: las representaciones léxicas, que se generan con la utilización del ***léxico científico***; las ***representaciones icónicas***, que incluyen dibujos, pictogramas y diagramas básicos que no presenten una clara estandarización de elementos; y las ***representaciones algebraicas***, mediante las cuales se simbolizan las cantidades de las magnitudes termodinámicas. Cuando nos referimos a las ***representaciones algebraicas*** no incluimos las ecuaciones matemáticas, que tratamos en ***EA4***. Éstas son entidades de una jerarquía superior, y en ellas se simboliza de manera funcional la dependencia entre varias magnitudes diferentes, relacionando sus respectivas representaciones algebraicas mediante operaciones matemáticas, con unas limitaciones que vienen dadas por la naturaleza de las magnitudes y por el rango de condiciones en las que es válida la relación. Las ecuaciones matemáticas son útiles en la transformación de los datos necesarios para resolver un problema de base científica.

Las ***representaciones icónicas*** son quizá las menos eficaces en la resolución de cuestiones problemáticas, pero permiten reflejar de manera visual algunos conceptos científicos relacionados con el ***desorden termodinámico***, como los movimientos de translación, vibración y rotación de las partículas, la distribución espacial de éstas o su disposición en niveles de energía que se corresponden con los microestados permitidos para el sistema. Dado que las ***representaciones icónicas*** no están sujetas a ***convenios*** que

las estandaricen, en ellas el grado de ***contribución personal*** es bastante elevado. Así, aunque las representaciones icónicas de distintos individuos comparten trazos básicos, en general cada individuo tiende a utilizar diferentes símbolos, y los matices que introduce la contribución personal suelen intervenir en la adopción de los ***criterios de decisión***: al no estar tan reglamentadas por la estandarización, las representaciones icónicas tienden a reflejar mejor las ideas idiosincrásicas de los alumnos que las representaciones algebraicas y gráficas; además, tienden a focalizar la atención visual en determinados aspectos de la situación, hecho o fenómeno al tiempo que obvian o eliden otros, y por lo tanto pueden orientar la integración de ideas en una dirección determinada.

Las representaciones léxicas referenciales utilizan el ***léxico científico***, caracterizado por dos valores básicos: una gran *precisión en el lenguaje* y una cuidada monosemia, en contraposición a la polisemia cotidiana (*eliminación de la polisemia cotidiana*). El ***léxico científico*** sigue unos ***convenios*** que en la actualidad le dan una aplicabilidad casi universal en la comunidad científica, aunque no se debe olvidar que en el ámbito de la Termodinámica existen una serie de controversias terminológicas.

Por último, se introducen las ***representaciones algebraicas*** y se declara la necesidad de expresarlas con ***consistencia en la simbología***, para lo cual se recurre a ***convenios*** que estandarizan diversas variables: los *valores de los conceptos termodinámicos*, los *signos de los conceptos termodinámicos* y las *unidades de los conceptos termodinámicos*. Gracias a la estandarización de los *signos de los conceptos termodinámicos*, algunas de las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales se convierten en ***criterios termodinámicos de decisión***, cuyo fundamento teórico ya está recogido en los esquemas de razonamiento. Sobre las *unidades de los conceptos termodinámicos* se activan varias relaciones que ayudan a construir su significado:

Se enumeran las unidades SI utilizadas en Termodinámica (el *Kelvin*, el *Julio/mol* y el *Julio/mol·Kelvin*), y cada una de ellas se vincula a los conceptos termodinámicos a los que corresponde. Hemos decidido que la conexión entre las magnitudes y sus respectivas unidades se declare en ***EA2*** a través de las variaciones de las magnitudes, por dos razones: en primer lugar, porque así se facilita la lectura del esquema, y en segundo lugar, porque a la hora de resolver situaciones problemáticas, los alumnos tendrán que expresar no tanto valores de magnitud para distintos estados del sistema, como variaciones de las magnitudes asociadas al proceso objeto de estudio. La *variación de temperatura* se mide en *Kelvin*, la *variación de entropía*, en *Julio/mol·Kelvin*, y las demás variaciones de las magnitudes termodinámicas principales (*variación de energía interna*, *variación de entalpía* y *variación de energía de Gibbs*) en *Julio/mol*.

Queda claro entonces que las *unidades de los conceptos termodinámicos* expresan las dependencias de las magnitudes con respecto a la *cantidad de materia* del sistema, variable que en una reacción química se mide en mol y se analiza mediante la ***estequiometría***. Por último, se da significado a las *unidades de los conceptos termodinámicos* dentro del proceso

de medición (que queda implícito al esquema): se definen como el patrón de las ***escalas de medida***, lo que permite concretar los *valores de los conceptos termodinámicos*, que siempre se han de expresar acompañados de las unidades pertinentes. Las ***escalas de medida*** pueden adoptar dos valores: son *escalas relativas* las de la *entalpía* y la *energía de Gibbs* (aquí es evidente que debemos establecer el vínculo con la magnitud y no con su variación), y *escalas absolutas* las de la *temperatura*, la *energía interna* y la *entropía*.

Las "relaciones frontera" entre ***EA2*** y ***EA1*** tienen dos puentes de unión:

Por un lado, están las magnitudes termodinámicas y sus variaciones, así como las transferencias de energía *calor* y *trabajo*. En ***EA1*** se declara que todos éstos son constructos cuya identificación, control y exclusión posibilita la descripción de los procesos termodinámicos como evoluciones de los sistemas materiales; sobre la base de las descripciones construidas pueden elaborarse razonamientos explicativos, justificativos y predictivos que den cuenta de los procesos de cambio. En ***EA2***, los mismos constructos teóricos se enfocan desde el punto de vista de su representación, que facilita la construcción de los razonamientos interpretativos. Como se ve en ***EAT***, estas "relaciones frontera" entre ***EA1*** y ***EA2*** convergen hacia las magnitudes termodinámicas y sus variaciones, lo que refuerza la idea de que estas entidades teóricas ejercen el papel de herramientas en la interpretación de hechos, situaciones y fenómenos, y por tanto deben jugar un rol activo en la activación de destrezas y estrategias de resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química.

El otro puente que une ***EA1*** y ***EA2*** es la red de relaciones que se establece entre los subesquemas identificación y descripción de aspectos termodinámicos, interpretación de aspectos termodinámicos y representación de aspectos termodinámicos. Cuando se realiza el análisis de aspectos termodinámicos, primero es necesario identificar el sistema, el proceso y las variables que cambian como consecuencia de éste. Sobre esta base, se construyen razonamientos interpretativos sobre el proceso de interés, y aquí se activa la acción análisis de aspectos termodinámicos, que involucra destrezas relacionadas con la interpretación de aspectos termodinámicos. En esta acción analítica es muy útil operar con las representaciones más adecuadas para visualizar las características del sistema y el proceso, simbolizar los cambios sucedidos y manipular los datos con la finalidad de obtener unos resultados que permitan tomar decisiones de cara al contraste de las hipótesis de partida. Estos vínculos entre las acciones de resolución de problemas y las acciones de análisis de aspectos termodinámicos se hacen explícitas en ***EA4***; pero en ***EA2*** se declara la idea de que las representaciones ayudan a construir interpretaciones, y que ambas, interpretaciones y representaciones, requieren un proceso previo de identificación y descripción de los aspectos clave del hecho, situación o fenómeno. Así, ***EA2*** justifica su lugar central en el macroesquema de acción EAT, porque sirve de puente para establecer conexiones entre las herramientas del estudio termodinámico (***EA1***) y el proceso de resolución de problemas termodinámicos (***EA4***). En el apartado correspondiente a EAT se desarrollan más detenidamente estas estructuras de acción.

Esquema referencial de acción *Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3)*

EA3 recoge la estructura de acción referencial sobre las representaciones gráficas que se utilizan en Termoquímica y Termodinámica Química: los diagramas de entalpía y las gráficas entrópicas (anexo, ***Volumen B_2***). Se hace explícito que la construcción de estas gráficas ayuda a realizar inferencias y a obtener resultados sobre las magnitudes termodinámicas, lo que contribuye a resolver problemas de base científica.

El esquema dominante de ***EA3*** es representación de aspectos termodinámicos y se conecta a diez subesquemas: representaciones gráficas, curvas, ejes, convenios, representación de datos relacionados, ecuaciones termoquímicas, ciclos de ecuaciones termoquímicas, dependencias de las magnitudes termodinámicas, realización de inferencias y obtención de resultados sobre las magnitudes termodinámicas.

Como hemos comentado en el apartado correspondiente a ***EA2***, ***EA3*** es una gran ramificación de ***EA2*** que contiene las destrezas y estrategias relacionadas con la elaboración e interpretación de representaciones gráficas. Por este motivo, presenta una estructura vertical de fácil lectura y en la que el esquema dominante ***representación de aspectos termodinámicos*** da paso directamente al subesquema ***representaciones gráficas***. Se declara que en Termodinámica existen dos tipos de gráficas útiles: los *diagramas entálpicos* y las *gráficas entrópicas*. Toda representación gráfica presenta dos elementos básicos, las ***curvas*** y los ***ejes***. Éstos sirven para situar sobre ellos los datos correspondientes a distintas *magnitudes*, las cuales pueden adoptar dos valores distintos, según ejerzan de *magnitud independiente* (es decir, el *avance del proceso* o la *temperatura*) o de *magnitud dependiente* (la *entalpía* o la *entropía*). Los ***ejes*** intersecan en el valor correspondiente al *origen de coordenadas*, que representa el cero de ambas magnitudes. Para facilitar la *legibilidad* de la gráfica, los ***ejes*** incorporan *divisiones* que tienen que ajustarse a los *valores de los conceptos termodinámicos* y a las *unidades de los conceptos termodinámicos*. También para lograr una mayor *legibilidad*, teniendo en cuenta que los datos se expresan algebraicamente, las ***representaciones gráficas*** se acogen a ***convenios***.

Las **representaciones gráficas** consisten en la **representación de datos relacionados** entre sí de tal manera que se organizan en pares de datos conocidos; éstos definen las **curvas** y consisten en pares de **valores de los conceptos termodinámicos**. La estructura de acción no cita explícitamente que cada par de valores se compone de un valor de la magnitud independiente y el correspondiente de la magnitud dependiente, sino que esta idea se construye indirectamente a través del subesquema **ejes**, con su ramificación en la variable divisiones: las relaciones que se activan alrededor de ambos elementos articulan las acciones necesarias para que los alumnos decidan, en primer lugar (a la izquierda en el esquema), qué magnitud van a representar en cada eje, y, en segundo lugar (a la derecha), cómo serán las divisiones adecuadas a los valores y las unidades de las magnitudes que se van a representar. Con toda esta información, se eligen los pares de

datos conocidos, que materializan sobre una representación gráfica la dependencia entre las dos magnitudes objeto de estudio. Se hace explícito que los pares de datos conocidos suelen corresponderse con los valores de las magnitudes independiente y dependiente en los estados inicial y final del sistema. Estos estados se expresan en las **ecuaciones termoquímicas**, que contienen información sobre los valores de los conceptos termodinámicos y suelen agruparse en **ciclos de ecuaciones termoquímicas** sobre los que se realizan cálculos basados en las leyes de Lavoisier-Laplace y Hess.

Para completar el esquema ***EA3*** solamente queda por concretar cómo son las ***curvas*** de las ***representaciones gráficas***: son *curvas discontinuas* si solamente aportan información sobre los *estados inicial y final* y no contienen datos sobre estados intermedios, o pueden tomar el valor de *curvas continuas* si expresan ***dependencias de las magnitudes termodinámicas***, en cuyo caso se dispondrá de cuantos pares de valores se desee. El ejemplo de *curva discontinua* por excelencia es el *diagrama entálpico*, en el que se representa la *entalpía* del sistema frente al *avance del proceso*, con los pares de datos de los estados inicial y final. Al leer en el eje vertical la diferencia de entalpía entre ambos estados, se obtiene la variación de entalpía del proceso. El ejemplo de *curva continua* más utilizado es la *gráfica entrópica*, que recoge la dependencia de la *entropía* del sistema en función de la *temperatura*. La gráfica presenta distintos tramos crecientes que representan el patrón de aumento de la entropía con la temperatura para cada estado de agregación del sistema (y, en cada estado de agregación, para cada una de las estructuras químicas presentes).

Solamente queda por declarar que la realización de ***representaciones gráficas*** ayuda a la ***realización de inferencias*** sobre los procesos, además de proporcionar un método sencillo y visual para la ***obtención de resultados sobre las magnitudes termodinámicas***.

Las "relaciones frontera" de ***EA3*** llegan a todos los esquemas de acción. Las conexiones hacia ***EA1*** pasan por las magnitudes termodinámicas involucradas en las representaciones gráficas, esto es, la *temperatura*, la *entalpía* y la *entropía*, así como por las ***dependencias de las magnitudes termodinámicas***, sobre las cuales se aporta información en las *curvas continuas*. Los vínculos con ***EA2*** expresan las características comunes entre las ***representaciones gráficas*** y otras modalidades de ***representación de aspectos termodinámicos*** (en especial, de las representaciones algebraicas): la adopción de ***convenios*** y la utilización de *valores de los conceptos termodinámicos* y *unidades de los conceptos termodinámicos*. En el apartado correspondiente a ***EA4***, comentaremos las "relaciones frontera" que vinculan ***EA3*** con este esquema de acción, el último y el de mayor nivel de abstracción.

Esquema referencial de acción *Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química (EA4)*

Representa la estructura de acción referencial que recoge las etapas del proceso de resolución de cuestiones problemáticas en Termoquímica y Termodinámica Química. ***EA4***

es, por tanto, el esquema de acción que más integra los tres niveles de conocimiento (identificación, interpretación y transferencia), en especial los dos últimos, y aporta una gran capacidad descriptiva e interpretativa al macroesquema ***EAT***, porque expresa las destrezas y sobre todo las estrategias que se ponen en juego cuando se responde razonadamente a cuestiones de base científica. Al relacionar entre sí las acciones de mayor nivel de abstracción y planificación, la estructura de ***EA4*** abre hacia los demás esquemas múltiples conexiones mediante las cuales se detallan las acciones concretas que tienen más éxito en la resolución de problemas en la Termodinámica de los procesos químicos (anexo, ***Volumen B***$_2$).

El esquema dominante es, nuevamente, análisis de los procesos termodinámicos, y se incluyen además veintiséis subesquemas: emisión de hipótesis, selección y aplicación de estrategias de obtención de datos, lectura comprensiva de las cuestiones, realización de inferencias, dependencias de las magnitudes termodinámicas, consulta de fuentes bibliográficas, realización de medidas experimentales, obtención de datos sobre las magnitudes termodinámicas, selección y aplicación de estrategias de transformación de datos, transformación de datos sobre las magnitudes termodinámicas, representaciones gráficas, tratamiento matemático, representaciones algebraicas, ecuaciones termoquímicas, ecuaciones matemáticas, obtención de resultados sobre las magnitudes termodinámicas, interpretación de los resultados, establecimiento de significados, conclusiones, toma de decisiones, criterios de decisión, criterios termodinámicos de decisión, criterios medioambientales de decisión, criterios tecnológicos de decisión, criterios socioeconómicos de decisión y contraste de hipótesis.

En la estructura de ***EA4*** se observan dos grandes redes de relaciones, la primera centrada en torno a las acciones de ***selección y aplicación de estrategias de obtención de datos*** y ***selección y aplicación de estrategias de transformación de datos***, y la segunda ligada a la acción de ***contraste de hipótesis***.

El primer grupo de relaciones que conviene analizar es el que establece las etapas de resolución de los problemas, que hemos recatado de Kempa (1986), Gil y Martínez (1987a), Del Carmen (1987) y Gil *et al*. (1988a, 1988b). Así, se vincula el esquema dominante ***análisis de los procesos termodinámicos*** con los subesquemas ***emisión de hipótesis***, ***selección y aplicación de estrategias de obtención de datos***, ***selección y aplicación de estrategias de transformación de datos*** y ***contraste de hipótesis***. A continuación se comentan, por orden, las pequeñas redes de conexiones que desarrollan las acciones relacionadas con cada una de estas etapas de resolución de problemas:

En cuanto a la ***emisión de hipótesis***, se trata de un proceso diferente en cada situación problemática, por lo que decidimos no limitar su significado añadiéndole condiciones; solamente se especifica que su naturaleza va a condicionar la siguiente etapa de resolución de problemas, que es la ***selección y aplicación de estrategias de obtención de datos***.

Esta segunda etapa incluye tres acciones, la primera obligada en todas las cuestiones que se plantean en el aula, y las dos siguientes, específicas de algunas actividades en concreto: son, respectivamente, la ***lectura comprensiva de las cuestiones***, la ***consulta de fuentes bibliográficas*** y la ***realización de medidas experimentales***. Cada una de ellas tiene distintas implicaciones, y nos hemos centrado en las de las dos acciones comunes a más actividades de nuestras propuestas de enseñanza. Sobre la ***lectura comprensiva de las cuestiones***, se destaca que es imprescindible en el ***análisis de procesos termodinámicos*** y que permite la ***realización de inferencias***. De la ***consulta de fuentes bibliográficas*** se detallan aquellas fuentes concretas que se espera los alumnos utilicen en el aula: las *actividades ya realizadas*, las *tablas de datos termodinámicos* (que aportan *valores de los conceptos termodinámicos*) y *otras fuentes de información*, que son el *libro de texto* e *Internet*. Las tres acciones de la ***selección y aplicación de estrategias de obtención de datos*** permiten la ***obtención de datos sobre las magnitudes termodinámicas***, que es la base de la siguiente etapa de la resolución de problemas: la ***selección y aplicación de estrategias de transformación de datos***.

En esta etapa se produce la ***transformación de datos sobre las magnitudes termodinámicas***, esto es, de los datos que se obtuvieron mediante las acciones anteriores. Obsérvese que no hablamos de "valores de las magnitudes termodinámicas", sino de "datos sobre las magnitudes", porque no nos referimos únicamente a los datos que se concretan en valores numéricos; se incluyen también las aproximaciones semicuantitativas y las estimaciones cualitativas. Estos datos se transforman utilizando dos técnicas: la realización de ***representaciones gráficas*** y el ***tratamiento matemático***, que permite la ***realización de inferencias*** (también lo hacen las representaciones gráficas, como habíamos establecido en ***EA3***). El ***tratamiento matemático*** de los datos requiere que éstos (aunque sean de tipo cualitativo) se simbolicen mediante ***representaciones algebraicas***, y que se recurra a ***ecuaciones termoquímicas*** y ***ecuaciones matemáticas***, de entre las cuales citamos las ocho más utilizadas en Termodinámica. Con estos elementos se llevan a cabo las estimaciones o cálculos pertinentes para pasar a la siguiente acción, que es la ***obtención de resultados sobre las magnitudes termodinámicas***. Aquí termina la ***selección y aplicación de estrategias de transformación de datos***, y da comienzo la última etapa de la resolución de problemas: el ***contraste de hipótesis***.

Una vez que se ha completado la ***obtención de resultados sobre las magnitudes termodinámicas***, se da paso a la ***interpretación de los resultados***. Es obvio que todo resultado, cuantitativo o cualitativo, tiene un significado que hay que dilucidar (***obtención de significados***) y unas implicaciones. En el caso de los problemas termodinámicos, deben estudiarse tres tipos de implicaciones: las *transferencias energéticas*, la *espontaneidad del proceso* y (como en cualquier otro ámbito científico) el *error* cometido en las etapas anteriores, teniendo en cuenta la precisión de los datos de partida y de los métodos y técnicas que se aplicaron para obtener los resultados. La ***interpretación de los resultados*** permite, además de la ***realización de inferencias*** que podrían conducir a nuevos

resultados, la obtención de unas ***conclusiones***, que están condicionadas por el *error*. Las ***conclusiones*** son la base de la ***toma de decisiones*** que se aplica al ***contraste de hipótesis***, y las decisiones que se adopten tienen que basarse en ***criterios de decisión*** aceptables desde el punto de vista científico. Establecemos cuatro clases de criterios, en función de los aspectos del problema que permiten analizar:

Gracias a los **criterios termodinámicos de decisión** (que a su vez pueden obtener tres valores: *criterios termodinámicos de endotermia/exotermia*, *criterios termodinámicos de espontaneidad* y *criterios termodinámicos de equilibrio*) pueden evaluarse los costes del proceso y los perjuicios del proceso; también los criterios socioeconómicos de decisión permiten estimar el peso de estos factores en las decisiones finales. Mediante los criterios medioambientales de decisión se analizan fundamentalmente los perjuicios del proceso, mientras que los criterios tecnológicos de decisión se focalizan en los costes del proceso.

Las conexiones de ***EA4*** con los demás esquemas de acción son similares a las que hemos descrito cuando comentábamos las "relaciones frontera" del esquema de razonamiento ***ER5***. ***EA4*** representa las acciones en las que se fundamentan y hacia las que se encaminan todas las descripciones, interpretaciones y representaciones que se elaboran en Termoquímica y Termodinámica Química, y por este motivo sus "relaciones frontera" llegan a todos los esquemas de ***EAT***:

La etapa de ***emisión de hipótesis*** no se relaciona con elementos de ningún otro esquema de acción, para no limitar la formulación y el alcance de las hipótesis que se pueden plantear para cada proceso.

La etapa de ***selección y aplicación de estrategias de obtención de datos*** se vincula con ***EA1*** indirectamente a través del esquema dominante que ambos comparten (***análisis de los procesos termodinámicos***), al activarse las relaciones con los correspondientes subesquemas de identificación y descripción, interpretación, y representación de aspectos termodinámicos. Además, los vínculos con ***EA1*** convergen también con ***EA2*** y ***EA3*** en el elemento ***realización de inferencias***. Las inferencias que se realizan al resolver una cuestión problemática pueden basarse en la ***lectura comprensiva de la cuestión planteada*** (***EA4***), en el ***tratamiento matemático*** que se realiza sobre las representaciones algebraicas (***EA2***), o en la realización de ***representaciones gráficas*** (***EA3***); en todo caso, se relacionan con las ***dependencias de las magnitudes termodinámicas*** (***EA1***). La etapa de ***selección y aplicación de estrategias de transformación de datos*** se conecta con elementos de los esquemas ***EA2*** y ***EA3***, en los cuales se representan las estructuras de acción necesarias para generar las distintas representaciones de los datos termodinámicos sobre las cuales se realiza la transformación. En cuanto a la última etapa de resolución de problemas, el ***contraste de hipótesis***, la única conexión directa que se establece entre ***EA4*** y los otros esquemas de acción es el vínculo de las contribuciones personales de las representaciones icónicas a la aplicación de los ***criterios de decisión***, lo que introduce un cierto matiz de subjetividad en el esquema, más allá de la aplicación de los criterios universalmente

aceptados: las representaciones icónicas que genera cada individuo sobre la estructura de los sistemas químicos pueden tener repercusiones en la toma de decisiones. Por supuesto, en la aplicación de los criterios medioambientales, socioeconómicos y tecnológicos también se ponen en juego múltiples factores subjetivos, en este caso relacionados con las actitudes, valores y normas personales y sociales del alumnado. La relación de la contribución personal de las representaciones icónicas simboliza, en cierto sentido, un matiz de subjetividad que el individuo puede aplicar a los criterios termodinámicos de decisión, *a priori* totalmente objetivos.

Macroesquema referencial de acción *Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química (EAT)*

Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química es el macroesquema que articula los razonamientos representados en ***EA1***, ***EA2***, ***EA3*** y ***EA4*** (anexo, ***Volumen B$_2$***). Con ***EAT*** se hace explícita la estructura general de acción por la que se pone de manifiesto la relación entre las afirmaciones sobre el conocimiento que se quieren verificar y las etapas del proceso necesario para ello, etapas entre las cuales se incluyen las estrategias de recogida y transformación de datos.

Las estructuras de acción representadas mediante los cinco ***EAs*** referenciales se conectan entre sí según se recoge en la *Figura 10* (página siguiente). En ella se observa la relación entre las herramientas, las destrezas y las estrategias que se ponen en juego en la resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química, proceso que requiere el análisis de los procesos termodinámicos. Las acciones principales del proceso de resolución de problemas (esto es, la emisión de hipótesis, la obtención de datos, la transformación de datos y el contraste de hipótesis) están representadas dentro del espacio dedicado a ***EA4***, y se señalan con los números 1,2 3 y 4, respectivamente, para indicar que la realización de dichas acciones sigue la secuencia marcada por la numeración. Sin embargo, las acciones de que consta el análisis de procesos (identificación, interpretación y representación de aspectos termodinámicos) se corresponden con los esquemas de acción ***EA1***, ***EA2*** y ***EA3***, y se señalan con las letras a, b, c, puesto que no es necesario llevarlas a cabo en el orden descrito. Recordemos que ***EA1*** incluye la identificación de los sistemas y procesos y la interpretación de las transformaciones que suceden como consecuencia del cambio de estado termodinámico. Por este motivo, ***EA1*** se halla estrechamente vinculado a ***EA2*** y ***EA3***, los esquemas que recogen la representación de los aspectos relevantes en Termodinámica. Ya hemos indicado que ***EA2*** ilustra la estructura de acción sobre las representaciones de tipo léxico, icónico y algebraico, y que ***EA3*** es la ramificación de ***EA2*** que introduce las representaciones gráficas. La realización de las representaciones requiere de unos datos (que se obtienen en la segunda acción de la resolución de problemas) y permite procesarlos (acción 3). Con ello se obtienen unos resultados que sirven de base para llegar a unas conclusiones, y éstas guían las decisiones sobre las que se completa el contraste de las hipótesis planteadas.

Los movimientos horizontales desde ***EA1*** hasta ***EA4*** hacen fluctuar las acciones entre la utilización de herramientas teóricas (como las variaciones de las magnitudes termodinámicas o las leyes de la Termoquímica y los principios de la Termodinámica), la puesta en juego de destrezas y la realización de estrategias. Las primeras se encuentran representadas en la zona izquierda del esquema, y las destrezas y estrategias se hacen más complejas hacia la derecha.

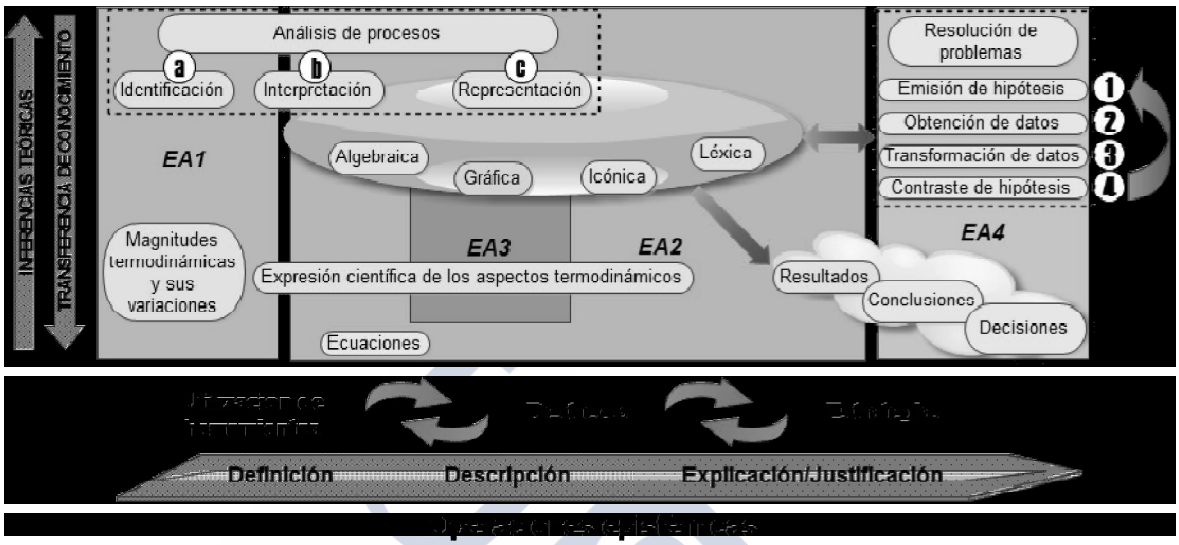


*Figura 10: distribución de las conexiones entre los esquemas **EA1**, **EA2**, **EA3**, **EA4** y **EA5** en el macroesquema de razonamiento **EAT***

En la estructura de ***EAT*** las relaciones no se organizan claramente de arriba abajo en grandes bloques. Sí se observa que la progresión en la abstracción es contraria a la de ***ERT***, porque en éste crece según se avanza de arriba abajo, y en la estructura de ***EAT*** la activación de elementos en este sentido guía las acciones hacia su concreción en resultados que permiten visualizar qué tipo de conclusiones se pueden extraer. Desde este punto de vista, el desplazamiento vertical descendente permite una mayor transferencia de conocimiento en ***EAT***. La activación de relaciones en sentido contrario facilita la realización de inferencias teóricas, porque al activar vínculos que favorecen la reflexión sobre la manipulación de datos y la obtención de resultados concretos, se ayuda a construir una visión global del proceso de análisis termodinámico. También se observa un aumento en el nivel de abstracción y planificación de las acciones de derecha a izquierda, como consecuencia de la activación de estrategias más complejas.

De derecha a izquierda, además de apreciarse la progresión de complejidad de las acciones desde la utilización de herramientas teóricas hasta la realización de estrategias, se observa una progresión epistémica en las relaciones que vinculan los subesquemas, las variables y los valores. Como sucede en el macroesquema de razonamiento ***ERT***, las relaciones situadas a la izquierda tienen un perfil identificativo y descriptivo, mientras que las de la derecha se activan con operaciones epistémicas más interpretativas y permiten elaborar explicaciones, justificaciones y predicciones cada vez más complejas.

En lo que respecta a la progresión ontológica en las relaciones que vinculan los subesquemas, las variables y los valores, la naturaleza ontológica de los constructos científicos del esquema progresa desde la categoría de objetos hacia la de eventos en dirección diagonal ascendente, de inferior izquierda a superior derecha. Siguiendo esta dirección y sentido se pone de manifiesto el papel de las magnitudes termodinámicas y sus variaciones como herramientas útiles en el estudio de la dinámica de los procesos:

Las variaciones de las magnitudes termodinámicas permiten la expresión científica de los aspectos termodinámicos, y por ello su interpretación y representación es necesaria en la obtención de resultados. Éstos se generan mediante la transformación (acción 3) de aquellos datos relevantes de los que se dispone o que se consiguen a través de diversas fuentes (acción 2), teniendo en cuenta las hipótesis de partida (acción1) del proceso de resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química.

El croquis de la *Figura 10* (página anterior) reproduce estas características ontológicas y epistemológicas de las estructuras de razonamiento del macroesquema ***Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química*.** Su lectura se resume en las distintas direcciones:

En diagonal de arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha, se recorre el proceso de resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química, desde la identificación del proceso hasta la toma de decisiones sobre los aspectos que interesa estudiar. Con el desplazamiento de inferior izquierda a superior derecha, se recorre la progresión ontológica en el sentido objetos-estados-eventos. Las componentes vertical y horizontal del macroesquema señalan, respectivamente, la concreción de las acciones más abstractas hacia la ejecución de los planes (de arriba abajo) y la potenciación de las operaciones epistémicas más interpretativas (explicación, justificación, predicción) sobre la base de las identificativas y descriptivas (de derecha a izquierda). Así pues, la lectura en vertical permite estimar hasta qué punto los alumnos llevan a la prática las acciones que los guían hacia la obtención de decisiones sobre las hipótesis de partida. La lectura en horizontal ayuda a visualizar, como sucede en ***ERT***, el crecimiento de la profundidad interpretativa de las acciones, correspondiéndose con el desarrollo de destrezas que permiten expresar aspectos cada vez más complejos (***EA2*** y ***EA3***), y de estrategias más y más abstractas y planificadas, hasta llegar a articular el proceso completo de resolución de cuestiones de base científica, que se espera que los alumnos lleguen a realizar con el aprendizaje para resolver las actividades de nuestras propuestas de enseñanza.

TAREA 2.- Problemática de aprendizaje y de enseñanza de los contenidos (análisis didáctico del contenido deseable)

En la primera tarea se realizó un análisis del contenido científico, y como resultado se determinaron los contenidos objeto de aprendizaje; por medio de esquemas de razonamiento y de acción, se hicieron explícitos los marcos conceptual y procedimental referenciales, deseables desde la ciencia escolar.

Mediante la segunda tarea, se adaptan los contenidos a las capacidades de los alumnos a los cuales va dirigida, en este caso, alumnos de 17-18 años. Según el modelo de diseño y planificación que se ha seleccionado (Sánchez y Valcárcel, 1993; Domínguez, 2007), es fundamental conocer las características cognitivas de los estudiantes de esta edad, y se distinguen dos componentes:

- Desde el modelo constructivista, se tiene en cuenta el conocimiento de los estudiantes antes de la intervención (*Características del conocimiento previo de los estudiantes*, pág. 415);
- Desde el modelo evolutivo, se destaca la importancia de la demanda cognitiva de los contenidos que se deben aprender (*Exigencias cognitivas de los contenidos implicados y capacidades psicoevolutivas del alumnado*, pág. 439).

Con la finalidad de indagar en las concepciones que tienen los estudiantes antes de la intervención en el aula, se realizó una revisión de la literatura científica sobre los problemas de aprendizaje y las ideas alternativas en Termoquímica y Termodinámica Química (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008). Las conclusiones extraídas de este estudio, complementadas con un análisis de las exigencias cognitivas que demandan los contenidos objeto de aprendizaje (Shayer y Adey, 1986), proporcionan una base para adaptar los contenidos conceptuales y procedimentales a las características psicoevolutivas de los alumnos a los cuales van dirigidas las secuencias de enseñanza.

Características del conocimiento previo de los estudiantes

En la exposición del estado de la cuestión (*Estado de la cuestión: la Termodinámica de los procesos químicos en la enseñanza de las Ciencias*, pág. 118) se revisaron las tres últimas décadas de la investigación sobre la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos, con el objeto de analizar aquellas contribuciones de la literatura del área que pueden tener implicaciones para la investigación que aquí se presenta, y recoger las conclusiones que consideramos más relevantes para nuestro trabajo.

En este apartado se resumen las conclusiones que se han extraído de la revisión de las principales publicaciones sobre la enseñanza y el aprendizaje de la Termodinámica, y que ayudaron a diseñar, planificar e implementar las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química.

Pero antes de presentar las conclusiones del estado de la cuestión, se analiza cómo es el perfil de las contribuciones que se han revisado, y clasificadas en función de la década, el idioma y la fuente de publicación (revista del área, capítulo de un libro del área, Tesis doctoral…), el ámbito científico desde el que se enfoca (Física, Química, Biología y ciencias afines…) y la temática que aborda.

Se han considerado un total de 367 publicaciones que abarcan desde el año 1970 hasta la actualidad (año 2014). De ellas, la mayoría son artículos de las revistas del área (311 artículos, que representan el 85% de las contribuciones). Las comunicaciones

presentadas en congresos suponen un casi un 6% (21 aportaciones), y entre los 11 capítulos de libros y las 7 Tesis doctorales suman un 5%. El porcentaje restante, algo menor del 5%, corresponde a otros 17 textos relacionados con la enseñanza y aprendizade de la Termodinámica, entre documentos institucionales y contenidos publicados en páginas web. De las 367 publicaciones analizadas, casi las tres cuartas partes (73%) están en inglés, con un total de 268 contribuciones. El segundo idioma más frecuente es el español, con un 24% de frecuencia (87 publicaciones), y a gran distancia encontramos cinco idiomas que ocupan el 3% restante: el francés (5 contribuciones), el italiano (con 2), el gallego (otras 2), el catalán (2 también) y el portugués (con sólo 1).

Al clasificar las investigaciones atendiendo a la década de publicación, se observa un aumento progresivo en el interés que despierta la Termodinámica en el área de Didáctica de las Ciencias Experimentales:

Encontramos 12 publicaciones muy relevantes que datan de los años 70, y en la década de los 80 el número de investigaciones con gran proyección se multiplica prácticamente por siete y alcanza las 76 contribuciones (un 21% del total). De los años 90 destacamos 108 documentos, y 131 de la primera década del siglo XXI, con lo cual significan, respectivamente, un 29% y un 35% de las publicaciones revisadas. En los últimos cinco años se han publicado ya 40 estudios en fuentes de repercusión internacional, lo que asciende al 11% de nuestra revisión.

En cuanto al ámbito científico en el que se encuadran los estudios revisados, nuestra intención ha sido centrarnos en las investigaciones relacionadas preferentemente con la Química. Pero dado que los fundamentos de la Termodinámica son físicos, no podemos obviar las principales publicaciones de esta disciplina que dan cuenta de las múltiples conexiones disciplinares con la Química. Tampoco hemos olvidado las publicaciones temodinámicas más relevantes que entran en la Biología y ciencias afines. En bastantes casos (un 35% de las contribuciones), la interdisciplinaridad de los estudios hace muy difícil su clasificación inequívoca en el ámbito de la Física o la Química, así que hemos optado por enunciar una categoría de "Física y Química", en la que se incluyen 130 investigaciones. Del total de 367 contribuciones analizadas, las puramente físicas representan un 23% (84 publicaciones), mientras que las químicas ascienden a un 39% (son 143). En el ámbito de la Biología y ciencias afines hemos encuadrado 10 publicaciones, lo que hace un 3% del total.

A la hora de analizar las temáticas objeto de estudio en las investigaciones publicadas, ha de tenerse en cuenta que un buen número de ellas trata más de un aspecto. En un total de 172 investigaciones (47%) se exploran las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje en Termodinámica, mientras que la epistemología de los constructos científicos ocupa un 33% (120 publicaciones). A distancia se encuentra el tratamiento de la Termodinámica en los libros de texto, que se expone en 22 investigaciones (6% del total). Aunque un 37% de las aportaciones revisadas trata explícitamente los temas de reacción

química y enlace químico, solamente ascienden a un 11% (con 39 publicaciones) aquéllas que centran visibilemente sus esfuerzos en la enseñanza y el aprendizaje significativo de modelos científicos que den cuenta de los aspectos del dominio microscópico de representación del conocimiento.

Al analizar las temáticas más frecuentes, se llega a un resultado casi paradójico: la mayoría de los investigadores afirma rotundamente que hay pocas publicaciones dedicadas a la divulgación de propuestas de enseñanza de la Termodinámica; pero al hacer el recuento de los estudios en los que se incluyen el diseño y/o la implementación de materiales de aprendizaje y unidades didácticas, éste asciende a 172 contribuciones de entre las 367 revisadas, lo que representa un 47% del total. La opinión general de los investigadores cobra sentido cuando se refinan los datos: de las 172 publicaciones a las que nos acabamos de referir, son un tercio las que se encuadran exclusivamente en el ámbito de la Química (66 investigaciones), y de este tercio algo menos de la mitad (en concreto, 24) se centra en los niveles de ESO y Bachillerato; el número de las dedicadas al nivel universitario no es mucho mayor (33, si incluimos en este grupo las 9 que relacionan los niveles de Bachillerato y Universidad), y las otras 9 contienen recomendaciones generales para cualquier nivel de la enseñanza. En resumen, sólo 24 publicaciones ofrecen a los profesores e investigadores algunos materiales o propuestas didácticas para la enseñanza de la Termoquímica o la Termodinámica Química. Sin limitarse al ámbito de la Química, hay 69 documentos dedicados a los niveles de ESO y Bachillerato, entre los 24 de Química, otros 31 interdisciplinares con la Física, 13 del ámbito puramente físico, y 1 de Biología.

La muestra aún se reduce más: de las 24 referencias de Química, solamente 21 divulgan propuestas de enseñanza completas, mientras que las 3 restantes ofrecen recomendaciones didácticas, o una o pocas actividades que no constituyen auténticas secuencias didácticas. Al examinar las 31 referencias de la categoría de "Física y Química" para los niveles de la enseñanza preuniversitaria, se observa que son 17 las propuestas completas; en otras 11 se presentan recomendaciones para la enseñanza y en otras 3 se ofrecen actividades aisladas que no se articulan en unidades didácticas. En 2 de las publicaciones se sugieren métodos y materiales didácticos relacionados con las TIC, mientras que en el ámbito de la Química propiamente dicha no hay estudios dedicados a la utilización de las TIC como herramienta para la enseñanza y aprendizaje de la Termoquímica y la Termodinámica Química en ESO y Bachillerato. El número total de investigaciones en las que se divulgan experiencias de laboratorio es nuy bajo: 8, de las cuales 6 corresponden al ámbito de la Química (Física y Biología se quedan con una aportación cada una).

En resumen, de las 367 publicaciones analizadas en la revisión del estado de la cuestión, se queda en un 6% (21 aportaciones) la proporción de aquéllas que se dedican a la divulgación de propuestas didácticas completas para la enseñanza y aprendizaje de la materia de Química en los niveles de ESO y Bachillerato; si sumamos a éstas las 17 que

consideramos interdisciplinares, hacen un total de 38 aportaciones, un 10% del total de las revisadas. En esta tesitura, estamos de acuerdo con la afirmación de que existen pocas propuestas didácticas completas para la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica de los procesos químicos en los niveles preuniversitarios.

A continuación se extraen las principales conclusiones del estado de la cuestión que tienen interés para el desarrollo de esta investigación. Para sistematizar la exposición, las conclusiones se categorizan según los grandes núcleos temáticos que se identifican en la literatura: las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje en Termodinámica, y las propuestas y materiales de enseñanza elaborados por los investigadores hasta la fecha (año 2014).

Conclusiones que se extraen de las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje en el ámbito de la Termodinámica

El conocimiento empírico sobre los hechos y fenómenos cotidianos constituye una verdadera estructura cognoscitiva sobre la cual los alumnos organizan y estructuran el conocimiento científico. Por tanto, aunque el análisis conceptual es un buen punto de referencia en la elaboración de secuencias de actividades, una de las primeras tareas que se deben realizar es la indagación en los conocimientos con los que los alumnos llegan al aula y en las dificultades a las que se enfrentan durante el proceso de aprendizaje. De la determinación de la problemática de aprendizaje se extraen conclusiones que ayudan a adaptar los contenidos a las características de los alumnos a los cuales van dirigidas las propuestas de enseñanza.

De la revisión de la literatura científica (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008), se concluye que las dificultades de aprendizaje relacionadas con la Termodinámica tienen muy diversas fuentes de origen y de influencia que favorecen su permanencia a lo largo de años de escolarización. Muchos de los obstáculos se deben a la propia naturaleza de la Termodinámica, a su alto nivel de abstracción, su elevada demanda conceptual (Dixon y Emery, 1965) y las formas de razonamiento que hay que utilizar para analizar científicamente los aspectos energéticos de los procesos naturales (Rozier y Viennot, 1991). También existen dificultades de aprendizaje relacionadas con una deficiente integración de los dominios macroscópico, microscópico y simbólico de representación de la materia (Johnstone, 1982). Se detectan asimismo ideas y estructuras de razonamiento alternativas asociadas a ciertos prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica, como la temperatura, el calor, la energía, el enlace químico y la reacción química. Por último, algunos obstáculos se deben a la influencia del lenguaje cotidiano, a veces promovido en las situaciones de enseñanza y aprendizaje, y a la necesidad de utilizar el lenguaje y métodos de las Matemáticas para representar y transformar datos termodinámicos. A la hora de diseñar y planificar propuestas didácticas, la comunidad educativa no debe olvidar estas contribuciones a la aparición y persistencia de ideas y estructuras de razonamiento alternativas.

Por lo general, las dificultades de aprendizaje que se han detectado se repiten en los estudiantes de distintos países y niveles educativos (ver, por ejemplo, Doménech, 2000), y las concepciones desarrolladas en los primeros años de escolaridad tienen un impacto significativo en el aprendizaje de la Termoquímica y de la Termodinámica Química (ver, por ejemplo, Carson y Watson, 1999, 2002; Sözbilir y Bennett, 2007). En general, los alumnos preuniversitarios y universitarios consideran que la Termodinámica es un área de conocimiento aburrida, muy teórica, de escasa relevancia para la vida real (Holman y Pilling, 2004) y muy difícil de aprender. Entran en clase con una percepción negativa de la materia y con poca esperanza de aprobarla, sobre todo quienes creen no tener una base matemática sólida (Holman y Pilling, 2004), porque está muy extendida la creencia de que la Termodinámica consiste en una serie de ecuaciones incomprensibles que hay que memorizar para aprobar los exámenes.

Muchas de las ideas alternativas y obstáculos de aprendizaje en Termodinámica persisten aunque la instrucción las combata explícitamente (Ochs, 1996; Teichert y Stacy, 2002), y en ocasiones reaparecen (Arnold y Millar, 1996).

- Se detectan ciertas características comunes a todos los problemas de aprendizaje y las ideas alternativas en Termoquímica y Termodinámica Química:
- Los significados cotidianos de los términos científicos dominan las interpretaciones y explicaciones de los alumnos, y en ocasiones las dificultades asociadas a la polisemia y ambigüedad del lenguaje cotidiano se ignoran o favorecen en la enseñanza tradicional. Una terminología poco adecuada por parte de los docentes y los libros de texto puede decantar los conflictos de significado entre el lenguaje cotidiano y el científico, a favor de aquél.
- Los estudiantes tienden a conformarse con una integración de los constructos termodinámicos en sus estructuras alternativas preexistentes, y suelen obviar las limitaciones de sus interpretaciones alternativas.
- Pocos despliegan razonamientos propios del nivel operacional formal. Tienden a mantenerse en el nivel operacional concreto y utilizar explicaciones causales lineales (Rozier y Viennot, 1991) y reducciones funcionales, así como analogías y explicaciones simplificadoras, algunas de las cuales aprendieron en los niveles básicos de enseñanza.
- Es especialmente persistente la estructura alternativa de las *formas de energía*, que está relacionada con una concepción pseudo-materialística de la energía. Las ideas situadas en este marco conceptual presentan una gran resistencia al cambio, porque éste debe producirse desde la categoría ontológica de materia a la de eventos (Chi *et al.*, 1994). Se han detectado también obstáculos de tipo epistemológico (Vosniadou, 1994; Vosniadou y Ioannides, 1998). La superación de los problemas ontológico y/o epistemológico requiere una gran cantidad de tiempo y esfuerzo cognitivo y, si el cambio conceptual y procedimental no es

completo, pueden llegar a coexistir ideas de diferentes marcos que pueden utilizarse en contextos distintos (Solomon, 1983a).

- Los alumnos manifiestan una clara tendencia a centrar su atención y sus expectativas de aprendizaje en la manipulación irreflexiva de expresiones algebraicas (Barlet y Mastrot, 2000). La enseñanza tradicional y la consideración social de las Matemáticas como lenguaje de la Ciencia suelen ayudar a eclipsar la comprensión conceptual y procedimental a favor de la algoritmización automática (por ejemplo, Ben-Zvi, Silberstein, y Mamlok, 1993).
- Suelen apoyar sus afirmaciones en meras observaciones (algunas, tautológicas) o en explicaciones macrofísicas, en tanto que las interpretaciones microscópicas sobre la naturaleza de la materia permanecen en un segundo plano. La comprensión de los conceptos y modelos microscópicos es fragmentaria y hay poca "conciencia microscópica": los estudiantes tienden a describir e interpretar los fenómenos físicos y químicos solamente desde el punto de vista macroscópico.

La única clasificación relevante de las ideas alternativas de los alumnos en Termoquímica y Termodinámica Química es la de (Thomas y Schwenz, 1998), quienes agrupan en seis categorías las principales tendencias observadas:

- Tendencia a definir los conceptos termodinámicos fundamentales de acuerdo con el lenguaje cotidiano. Aquí entrarían, por ejemplo, la definición del desorden termodinámico como desorden visual, caos, aleatoriedad o inestabilidad; la de reacción espontánea como proceso inmediato, observable o no intervenida por influencias externas; o la de proceso irreversible como evento rápido, irrevocable o que vuelve al estado inicial.
- Tendencia a utilizar los conocimientos informales de la experiencia cotidiana para explicar la termodinámica de los fenómenos químicos. Como ejemplos se pueden citar la predominancia de las descripciones e interpretaciones macroscópicas, la concepción de la entropía como una medida o causa del desorden del sistema, o la atribución de exotermia a toda reacción espontánea.
- Tendencia a confundir distintos conceptos termodinámicos. En esta tendencia, la estructura alternativa de las "formas de energía" permite identificar entre sí conceptos como la energía interna, la entalpía, la entropía y la energía de Gibbs, y el calor y el trabajo pueden entrar en este grupo vago e indistinto de "formas" que adopta la energía en los sistemas materiales.
- Tendencia a utilizar conceptos no termodinámicos (por ejemplo, cinéticos) en las interpretaciones sobre la Termodinámica de los procesos químicos. Se han documentado relaciones alternativas entre la exotermia y la velocidad de reacción, y entre ésta y la variación de energía de Gibbs; también hay asociaciones alternativas entre la entropía del sistema y las colisiones entre partículas.

- Tendencia a generalizar los conceptos y principios termodinámicos más allá de las condiciones en las cuales se pueden aplicar. Por lo general, los alumnos tienden a no reflexionar sobre las condiciones válidas en la aplicación de los conceptos y principios. En esta categoría se podrían encuadrar también las limitaciones alternativas impuestas a los conceptos termodinámicos, como la atribución de un signo concreto de variación de entalpía a todos los procesos de un determinado tipo (por ejemplo, a las disoluciones o a las reacciones de formación de compuestos), y las restricciones de la validez de la variación de entalpía, variación de entropía y variación de energía de Gibbs a algunos procesos, como las neutralizaciones ácido-base, los cambios de estado de agregación y las precipitaciones, respectivamente.
- Tendencia a errar en la aplicación de los conceptos termodinámicos (asociada a una falta de conocimiento sobre los mismos). Las ideas de esta categoría están relacionadas con la estructura alternativa de las "formas de energía" y con las dificultades en la aceptación de la conservación y la degradación de energía.

Dado que el objetivo de esta Tesis es elaborar, aplicar y evaluar dos propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química, nuestra clasificación de las ideas del alumnado en Termoquímica y Termodinámica Química es distinta a la de Thomas y Schwenz (1998), y similar a la de Duit y Häussler (1994), en el sentido de que cuatro de las cinco categorías que proponemos se refieren a un aspecto o característica fundamental de la energía; la quinta categoría obedece a la necesidad de conocer las dificultades de aprendizaje relacionadas con la utilización de los criterios de espontaneidad:

- ideas alternativas sobre la energía de los sistemas,
- ideas alternativas sobre la naturaleza de las transferencias energéticas,
- ideas alternativas sobre el balance de las transferencias energéticas entre el sistema y el entorno en el contexto de las reacciones químicas,
- ideas alternativas sobre la evolución de la distribución energética que experimentan los sistemas durante los procesos, e
- ideas alternativas sobre los criterios de espontaneidad en el estudio termodinámico de los procesos.

A continuación se resumen las principales ideas alternativas descritas en la literatura investigadora, en relación con cada una de las categorías enumeradas.

- <u>Ideas alternativas recurrentes:</u>
  - confusiones sistema-entorno, no identificación del proceso o las condiciones

  <u>*Relacionadas con la estructura alternativa de las formas de energía:*</u>

  - La energía puede adoptar muchas formas: energía interna, entalpía, entropía,

energía de Gibbs, calor, "variación de calor", capacidad calorífica, calor latente, variación de temperatura, energía de activación, cinética, potencial

- Las formas de energía se pueden intercambiar con (o convertirse en) otras, de similares características o asimilables.

Relacionadas con la identidad de las magnitudes:

- Confusión entre una magnitud y la variación de la magnitud
- El superíndice º para indicar que los valores numéricos están referidos a la presión normal o estándar

Relacionadas con la manipulación irreflexiva de las cantidades de magnitud:

- Esquema algorítmico fijado de antemano, mecanismo de fijación (;
- resuelven sin grandes dificultades las tareas cuantitativas, sin manifestar la misma eficacia en las tareas cualitativas
- No tienen en cuenta las unidades y/o los signos de los valores numéricos y se limitan a operar con cifras carentes de sentido)

- Ideas alternativas relacionadas con la energía del sistema

Sobre energía interna:

- Definiciones alternativas de *U*:
  - *U* es una manifestación visible de los fenómenos térmicos
  - *U* es la temperatura o el calor
  - *U* es la variación de calor
  - *U* se identifica con la entalpía o la variación de la entalpía, a través de la noción de calor o por confusión de volumen constante con presión constante
- Ausencia de un modelo microscópico para *U*
- *U* depende sólo de *T*
- Llaman "energía térmica" a *U* y/o *q*

- Ideas alternativas sobre la naturaleza de las transferencias energéticas

- dos objetos a diferente *T*, una vez en contacto, no tienen por qué alcanzar el equilibrio térmico

Sobre el trabajo:

- *w* es una forma de energía (por ejemplo,); es asimilable a la fuerza
- *w* no existe en las reacciones químicas, salvo que haya un pistón…
- *w* tiende a obviarse cuando se requiere el tratamiento simultáneo de más de dos variables

Sobre el calor:

- Son sinónimos totales o parciales de calor: temperatura, energía, energía térmica, a través de la estructura alternativa de las *formas* de energía
- *q* es una entidad material que calienta los cuerpos a medida que se almacena en ellos, y el calentamiento depende de la "fuerza" del calor, o del objeto para atrapar/retener el calor (Ver ; puede ser un fluido de características más o menos asimilables a las del calórico ; puede no tener masa
- *q* es una fuente de energía
- *q* es una energía susceptible de ser captada o absorbida por los cuerpos
- Las transferencias de "calor" se deben a una fuerza motriz inherente a éste
- la energía absorbida o cedida por calor en una reacción química se debe a la transferencia energética desde un reactivo principal o activo hacia otro secundario o pasivo
- El flujo de calor se mide mediante la variación de temperatura
- en condiciones isotérmicas no ocurren transferencias por calor

Sobre una supuesta conservación de energía en el sistema:

- la conservación se verifica solamente en aquellos procesos en los que no varía la *U* del sistema
- en una reacción se conservan las partículas y la naturaleza de los elementos químicos y, por extensión, la energía del sistema.
- si en el universo la energía se conserva, la variación de energía de cualquier sistema en cualquier proceso es cero
- La energía se usa o pierde en una reacción
- La energía se puede crear y destruir, porque los sistemas químicos son reservorios energéticos que dejan de funcionar cuando agotan su reserva

Sobre la conservación de energía en el universo:

- La energía en el universo no se conserva
- conservación de la energía es el ahorro energético
- No consideran la conservación de la energía cuando analizan un proceso
- Acepciones cotidianas de las palabras ley y conservación

Sobre las fuentes de energía:

- no diferencian entre las fuentes de energía y la energía en sí
- No identifican las fuentes de consumo energético ni los recursos naturales

- No identifican los patrones de consumo personal y social
- Dificultades para diferenciar las fuentes de energía renovables y no renovables
- Las ideas sobre la energía varían según el contexto

- Ideas alternativas sobre el balance de las transferencias energéticas entre el sistema y el entorno en el contexto de las reacciones químicas

- Sinónimos de entalpía o de variación de entalpía: el calor, la variación de calor o la capacidad calorífica, el calor latente, la variación de temperatura y la energía que se aporta al sistema
- No reconocen las restricciones de la variación de entalpía: condiciones de presión constante no procesos de trabajo diferente del $p \cdot \Delta V$

Calorimetría

- El aumento de la temperatura es un resultado o un producto de la reacción
- No sienten la necesidad de aludir a la cantidad de energía transferida
- no asocian la liberación neta de energía al entorno con la cantidad de materia del sistema
- la asocian con la concentración de la disolución y no con la masa del sistema
- Restringen la validez de ΔH: sólo aplicable a las neutralizaciones ácido-base, a las combustiones o a las reacciones exotérmicas

Sobre los diagramas entálpicos:

- no relacionan ΔH con:
  - el proceso de reacción
  - el convenio que asigna el valor cero a la entalpía de los elementos
  - los aspectos energéticos de la formación y ruptura de interacciones químicas
  - la estabilidad química del producto de reacción.
- ΔH se debe a la satisfacción de la tetravalencia del carbono

Sobre la exotermia/endotermia:

- $\Delta H_f > 0$ siempre, $\Delta H_{disolución} > 0$ siempre o $\Delta H_{disolución} < 0$ siempre
- Si $\Delta H < 0$, la reacción es exotérmica, pero el calor de reacción es positivo
- En función del signo de ΔH, sin explicación científicamente aceptable
- Cualquier reacción es endotérmica, porque requiere un aporte inicial de energía
- El balance energético asociado a una reacción química indica la espontaneidad
- El balance energético asociado a una reacción indica la velocidad de reacción

Sobre la elaboración de justificaciones y predicciones microscópicas:

- Falta de conocimientos sobre la naturaleza química de los sistemas para:
  - neutralizaciones ácido-base
  - reacciones entre un ácido mineral y un metal
  - solidificación de un líquido
  - disolución de una sal iónica, que se confunde con la fusión o disociación de la sal, y no hay formación de interacciones electrostáticas entre iones
- No relacionan la variación de energía del sistema con la ruptura y formación de interacciones entre partículas
- modelos alternativos fragmentarios e incoherentes sobre los intercambios microscópicos de energía
- las informaciones perceptibles de las tareas, el tipo de fenómeno y el orden en el que se observan los fenómenos influyen en los modelos que se activan
- Tres modelos alternativos sobre los aspectos energéticos de las rupturas y formaciones de interacciones químicas
  - La ruptura de enlaces en el sistema libera energía al entorno

    - Enlaces como reservorios energéticos

    - El reactivo es un "combustible" y por tanto "contiene" energía

    - Caso particular el ATP es un combustible celular el oxígeno "no contiene energía química" y que por este motivo ejerce de ente pasivo y el estímulo que provoca la liberación de la energía contenida en los enlaces del ATP es una reacción de tipo bioquímico

    - Aplicación a la nutrición o el funcionamiento de muchas máquinas de uso cotidiano

    - Aparece en libros de texto de Biología y Bioquímica
  - La formación de enlaces requiere que se aporte energía al sistema

    - Los enlaces son uniones físicas donde se localiza la energía
  - La ruptura y la formación de enlaces requieren un aporte de energía

    - La ruptura de los enlaces químicos se produce en dos etapas: la ruptura en sí (aporte de energía) y la inversión de la energía en la ruptura de más enlaces

    - Procesos en dos etapas: la ebullición de un líquido covalente, la disolución de una sal iónica, las reacciones químicas endotérmicas

    - Las reacciones endotérmicas y exotérmicas obedecen a mecanismos diferentes o se activan mediante fuentes de energía diferentes

Sobre el origen de los aportes de energía al sistema/reactivo:

- la ruptura de interacciones en el disolvente.
- el agua, que contiene una energía que se activa cuando se le añade la sal.
- el investigador, que agita la mezcla de disolución o cede energía de la mano con la que sostiene el recipiente

Sobre la causa de la liberación de energía al entorno:

- siempre es la acción de una llama o a una combustión
- La causa es «la energía que se añade a algo», es decir, el calor o la variación de entalpía

- Ideas alternativas sobre la evolución de la distribución energética que experimentan los sistemas durante los procesos

Ideas alternativas sobre la entropía:

- No la recuerdan en absoluto
- La entropía como forma de energía (por ejemplo, sinónima de la entalpía)
- Asimilaciones al "desorden"
  - es el "desorden" visuo-espacial de las partículas, una medida del desorden o la causa del desorden o del orden
  - "caos", "aleatoriedad", "inestabilidad"
  - Libros de texto: se define la entropía como la medida de desorden del sistema. Profesores: suelen utilizar modelos analógicos macroscópicos que refuerzan la concepción de la entropía como desorden visual
- La entropía y la energía cinética de las partículas del sistema
  - el desorden se asocia con el incremento de energía, el movimiento y la colisión de las partículas: los sólidos elementales o los puros, amorfos o cristalinos, tienen $S = 0$, porque no existe desorden/libertad/movimiento
  - identificación de la entropía con la temperatura o con ΔT
  - un alto grado de mezcla o con el aumento de éste
- La entropía y los microestados disponibles para las partículas del sistema
  - No establecen una conexión entre el desorden del sistema y los microestados de energía, ni después de la instrucción
  - microestado es un "pequeño estado" sin relación con la entropía

Sobre las variaciones de entropía que experimentan sistema y universo:

- ¿Cómo es la variación de entropía de los sistemas materiales?
  - Imaginan sin dificultad los incrementos de entropía asociados a los

cambios de estado progresivos y tienden a ensamblarlos en un modelo analógico concreto relacionado con el modelo cinético molecular

- El aumento de entropía del sistema se explica casi siempre en términos del "desordenamiento visual" de las partículas
- ΔS ofrece una prueba de que se ha realizado un trabajo sobre el sistema
- $\Delta S_{sistema} \geq 0$ para un sistema aislado
- $\Delta S_{sistema} > 0$ en los procesos físicos o químicos y biológicos
- $\Delta S_{sistema} = 0$ en un proceso adiabático o para un sistema abierto o cerrado
- Un sistema tiende siempre a evolucionar en el sentido en que se alcanza su valor máximo de entropía
- Una vida de alto consumo acelera la entropía

- ¿Cómo es la variación de entropía del universo?
  - $\Delta S_{universo} = 0$; en algunos casos, $\Delta S_{universo} < 0$
  - Al aumentar la velocidad de la entropía, disminuye la cantidad de materia y de energía útil para el ser humano

Sobre el segundo principio de la Termodinámica y la redistribución de la energía:

- No recuerdan en absoluto en qué consiste y para qué es útil o no lo aplican
- No existen pérdidas de energía por calor en algunos procesos, como el transporte de energía desde las centrales energéticas hasta los puntos de consumo
- No llegan a construir un modelo sobre la redistribución de la energía a lo largo de un proceso termodinámico

Sobre la espontaneidad y la irreversibilidad:

- Significados que coinciden con, o se aproximan a, los del lenguaje cotidiano
- Irreversibilidad: significados de alta velocidad o brusquedad, estatismo macroscópico, evolución en el sentido directo o regreso al estado inicial
- Espontaneidad: matices de movimiento rápido aleatorio, acción inmediata o rapidez o acción no dirigida
- Un proceso químico es irreversible si…
  - es irrevocable o inevitable
  - no es espontáneo o necesita el aporte de mucha energía para suceder (por lo tanto, si $\Delta G > 0$)
  - si es rápido o brusco
  - si permanece inmóvil
  - si sucede en sentido directo
  - si el sistema vuelve a su estado inicial una vez se ha alcanzado el equilibrio
  - Siempre: un proceso químico no tiene vuelta atrás; en un proceso físico se puede devolver el sistema al estado inicial

- En algunos libros de texto: imposibilidad de que un proceso cambie de sentido o aproximación "cinemática"

▪ Un proceso químico es espontáneo si…

- … y sólo si es observable
- sucede sin intervención externa: no necesita un aporte de energía/calor o no tiene energía de activación
- las reacciones químicas nunca son espontáneas, hay que intervenir en ellas
- la velocidad de reacción es elevada

¿En qué sentido sucede una reacción química?

▪ En el sentido señalado por la flecha de la ecuación química

▪ La "espontaneidad" ($\Delta G < 0$) no tiene relación con el hecho de que la reacción química tenga o no lugar

▪ la reacción sucede si "todas [las sustancias] parecen [estar compuestas de] moléculas" o si la ecuación/reacción está "ajustada"

Driving forces *de las reacciones químicas:*

▪ una reacción química no puede suceder sin una intervención activa externa como la acción del calor, las llamas o el fuego

▪ la adición de energía al sistema

▪ la absorción de energía/calor

▪ la reactividad o fuerza/actividad de las sustancias implicadas

▪ la diferencia de reactividades, que produce un "desplazamiento" favorecido por el reactivo más activo

❑ Ideas alternativas sobre los criterios de espontaneidad en el estudio termodinámico de los procesos

▪ Predominan las descripciones y explicaciones basadas en la percepción sensorial y otros aspectos del dominio macroscópico; prefieren limitarse a la manipulación de entidades matemáticas sin significado.

▪ Criterios de espontaneidad relacionados con los aspectos energéticos

- El calor de reacción o la variación de entalpía

- Exotermia asimilable a espontaneidad, en tres variantes:

- Si una reacción es espontánea (=sin intervención externa), esto se debe a que no necesita de la aplicación de energía/calor para suceder (=exotermia). Entonces, las reacciones espontáneas son necesariamente exotérmicas

- Las reacciones químicas son espontáneas (=rápidas) son necesariamente aquéllas en las que los productos tienen menor entalpía que los reactivos (exotérmicas $\Delta H < 0$)

- Las reacciones químicas son espontáneas si implican una transferencia de energía/calor al entorno, y la energía/calor es a la vez el motor del cambio: el motor inicia la reacción y cede energía/calor al entorno

- Las reacciones endotérmicas no pueden ser espontáneas ni algunos cambios de estado de agregación.

  - la variación de entropía del sistema

- Criterios de espontaneidad relacionados con los aspectos cinéticos
  - Las reacciones espontáneas son las que no requieren energía de activación
  - Las reacciones espontáneas son las ocurren rápidamente
- Criterios de espontaneidad relacionados con los aspectos de equilibrio
  - No utilizan ΔG como criterio de espontaneidad de las reacciones químicas, sobre todo en los contextos cotidianos
  - No razonan por qué $\Delta G < 0$ para que una reacción sea posible

Sobre la variación de la energía de Gibbs:

- *G* es la energía que tienen las sustancias cuando están libres
- *G* es la energía (térmica) ganada o perdida por el sistema
- *G* es la energía no utilizada en la reacción
- *G* es la energía interna que hace que las sustancias reaccionen
- *G* la máxima cantidad de trabajo realizado
- No reconocen las condiciones de aplicabilidad de la función de Gibbs
- Restringen la validez de la ecuación fundamental de la Termodinámica a las reacciones químicas estudiadas en clase, como las precipitaciones

¿Cuál es el perfil de la variación de la energía de Gibbs a lo largo de un proceso?

- *G* crece o decrece linealmente para hacer la reacción espontánea en una u otra dirección, dependiendo de si son los reactivos o los productos los que tienen una mayor cantidad de *G*
- *G* alcanza el valor cero o se aproxima asintóticamente al cero en el equilibrio

¿Qué significa el signo de ΔG de una reacción química?

- Indica la extensión del proceso, si se utiliza la velocidad de reacción como estimador del valor de ΔG, que en el equilibrio es cero/mínimo

- ΔG es alta cuando la reacción química es rápida
- ΔG elevado es el responsable de que un proceso químico sea rápido, y un sistema es estable si tiene muy baja o nula velocidad de reacción
- Un proceso rápido tiende a suceder completamente, así que una reacción con alta ΔG sucede en mayor extensión porque su velocidad es mayor
- $\Delta G \rightarrow 0$ es la causa de que la velocidad neta del proceso tienda a cero cuando el sistema se aproxima al estado de equilibrio
- Cuanto menor es ΔG, más rápido sucede la reacción química; cuanto más lenta es una reacción, menor es la variación de la energía de Gibbs asociada al proceso
- $\Delta G > 0$ para los procesos irreversibles, que son no espontáneos o necesitan el aporte de mucha energía para suceder
- $\Delta G \ll 0$ implica mayor velocidad de reacción

Sobre la ecuación fundamental de la Termodinámica:

- La memorización del criterio de espontaneidad $\Delta G < 0$ puede establecer una sinergia que refuerza la estructura alternativa de las formas de energía y la utilización de criterios de espontaneidad meramente macroscópicos
- La ecuación fundamental de la Termodinámica no tiene un significado físico, sólo sirve para realizar cálculos
- El único factor que influye en la espontaneidad es la temperatura
- Hay dificultades para analizar el término $T \cdot \Delta S$, debido a su signo negativo

De estos resultados, se extraen las siguientes conclusiones para el diseño de las actividades de *Termoquímica* y *Termodinámica Química*:

Varias de las ideas alternativas que se han detectado se deben a problemas de aprendizaje relacionados con los prerrequisitos conceptuales de la Termodinámica. A este respecto, en nuestras propuestas se recomienda al profesor esforzarse en identificar y subsanar las lagunas que se observen en los conocimientos iniciales de los estudiantes, aprovechando las actividades de exploración para diagnosticar las concepciones alejadas de la ciencia escolar y para generar ocasiones e incentivos para ponerlas en cuestión.

La Termodinámica utiliza las variables de estado en el estudio de los cambios que se producen durante los fenómenos físicos o químicos. Si se elabora una interpretación microscópica de los sistemas y de las magnitudes que permiten su análisis, se integran los conocimientos de la Termodinámica Clásica con los principales modelos químicos. De esta manera se complementa la descripción clásica (macroscópica) de los sistemas y los procesos con las interpretaciones microscópicas, que son mucho más potentes en la justificación y predicción de múltiples aspectos de la realidad. Varios autores son partidarios de que los modelos químicos se pongan en juego antes de abordar el estudio

de la Termodinámica Química (Gillespie, 1997). En las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* se pueden introducir las nociones microscópicas desde las primeras actividades, al mismo tiempo que se incorporan los conceptos termodinámicos. La energía interna, la entalpía, la entropía y la energía de Gibbs se suelen interpretar macroscópicamente a través del significado de las transferencias de energía calor y trabajo pV, pero conviene trabajar explícitamente la relación que existe entre estas magnitudes definitorias del estado termodinámico y las transferencias de energía que se producen a nivel microscópico, para que no se produzca la desconexión entre dominios de representación que se observa, por ejemplo, en lo relativo al concepto de sustancia (Johnstone, 1993).

La complejidad conceptual de la Química relacionada con la naturaleza de la materia se ha de abordar desde los tres niveles o dominios de conocimiento (Johnstone, 1982). Por este motivo, las dos propuestas de enseñanza ensayadas formulan actividades dirigidas a fomentar la integración de las perspectivas macroscópica, microscópica y simbólica. En las recomendaciones para la implementación (*Descripción de las secuencias de actividades* Termoquímica *y* Termodinámica Química, pág. 474) se enfatiza en la necesidad de construir los significados de los conceptos y enunciados termodinámicos desde el punto de vista microscópico y se insiste en el manejo de las representaciones simbólicas.

Proponemos introducir la perspectiva microscópica desde las primeras actividades, pero sin recurrir a la Termodinámica Estadística (Novak, 2003), para evitar que los alumnos atribuyan a las partículas del sistema un comportamiento fundamentado en la idea matemática de aleatoriedad, en detrimento de los modelos de enlace y reacción química, que aportan una mayor capacidad interpretativa que la aproximación estocástica. Una vez se haya dotado de significado macroscópico y microscópico a las magnitudes termodinámicas, se introducen la simbología matemática y las representaciones gráficas como herramientas útiles en la representación e interpretación de los aspectos energéticos. Al integrar los tres dominios, se logra una perspectiva teórica más amplia y de mayor capacidad descriptiva, explicativa y predictiva, que pone de manifiesto el carácter funcional del conocimiento científico.

En cuanto al desarrollo matemático de la Termodinámica, desde la literatura en Didáctica de las Ciencias se aboga por erradicar de las aulas la perspectiva mecanicista que caracteriza la enseñanza tradicional, y adoptar posturas coherentes con los enfoques constructivistas. En línea con estas ideas, consideramos que la comprensión debe preceder a la manipulación algorítmica de las relaciones conceptuales, porque pretendemos ayudar a los alumnos a construir un conocimiento cuyos principales atributos sean su carácter funcional y su aceptación racional y no dogmática.

Así pues, las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* se han diseñado y planificado de tal manera que las entidades termodinámicas se definen y caracterizan desde el punto de vista cualitativo antes de introducir los aspectos cuantitativos, para no

fomentar el desplazamiento de la comprensión de los conceptos y métodos de la Ciencia (Barlet y Mastrot, 2000) en favor de los mecanismos de fijación funcional (Furió y Calatayud, 2000; Furió, Calatayud, Bárcenas, y Padilla, 2000). Una vez que los significados termodinámicos son familiares para el alumnado, se introduce la simbología matemática y se opera con las magnitudes termodinámicas para obtener unos resultados numéricos dotados de significado científico. Se trata de que los estudiantes resuelvan problemas de base científica desde una perspectiva crítica, reflexiva y analítica, independientemente de que para la resolución se necesiten procedimientos algorítmicos.

Las técnicas o estrategias que contribuyen a dar significado a las ecuaciones matemáticas pueden reforzar la conexión conceptual de los nuevos constructos científicos con los ya aprendidos. Por ejemplo, la utilización de las convenciones IUPAC para los signos de las magnitudes termodinámicas y de las representaciones gráficas (Teichert y Stacy, 2002; Niaz, 2006) se pueden utilizar para apoyar el significado de las ecuaciones termoquímicas (Ben-Zvi, Silberstein, y Mamlok, 1993), para discutir las condiciones de validez de las expresiones matemáticas (Cotignola, Bordogna, Punte, y Cappannini, 2002) y para interpretar el significado de los datos numéricos de las variables termodinámicas, teniendo en cuenta que éstos son valores experimentales y dependen de las condiciones de temperatura y presión en las que se han obtenido (Carson y Watson, 1999). También ha de ayudarse a los alumnos a compatibilizar la manipulación de expresiones matemáticas con la utilización de las palabras y expresiones del lenguaje científico, que ayudan a describir el mundo natural con mayor capacidad comunicativa (Duschl, 1997; Hodson, 1998; Giere, 1999). Para que el cálculo no eclipse la comprensión conceptual, los razonamientos basados en datos de las magnitudes termodinámicas no deben desaparecer del aula para dar paso a los aspectos matemáticos (Wood y Battino, 2001).

¿Con qué profundidad es deseable desarrollar en la enseñanza secundaria el lenguaje matemático de la Termodinámica? En la literatura del área no se ha alcanzado un consenso al respecto (*El tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas*, pág. 133).

En las propuestas ensayadas, proponemos un nivel de rigor matemático accesible al alumnado del actual Bachillerato (MEC, 2007; XUGA, 2008), y recomendamos a los docentes que reajusten estas exigencias a los conocimientos de los alumnos, teniendo en cuenta que la composición de los grupos de clase puede ser bastante heterogénea, porque en una misma clase coinciden adolescentes de distintas modalidades del Bachillerato y porque en ESO las asignaturas de Matemáticas y Física y Química son optativas, así que es de esperar que no todos los estudiantes las hayan cursado.

Ya hemos descrito cuáles son los tipos de conocimiento que se pretende fomentar (*Los conocimientos deseables desde la ciencia escolar*, pág. 291) y las características del escenario en el cual tiene lugar el aprendizaje que se pretende alcanzar con la metodología ensayada [*El escenario de enseñanza y aprendizaje (organización del aula)*, pág. 293]. Para realizar la construcción significativa de conceptos, modelos, procedimientos y actitudes,

es fundamental que los alumnos desarrollen estrategias de razonamiento y destrezas y técnicas de investigación científica, y hemos de tener en cuenta las diferencias entre el razonamiento que utilizan los estudiantes respecto de los científicos cuando comienzan a analizar las situaciones experimentales (Valcárcel *et al.*, 1990). Éstos describen los sistemas utilizando magnitudes, para estudiar la interacción con el entorno y extraer conclusiones, mientras que los alumnos se fijan más en los hechos observados y en las propiedades y aplicaciones prácticas de los objetos; en ocasiones describen los estados del sistema utilizando magnitudes físicas, pero en general no sienten la necesidad de analizar las interacciones. Se observa también que los razonamientos de los estudiantes se basan más en el análisis de los estados cambiantes que en los de equilibrio, y que ponen en juego unos u otros conocimientos en función del contexto. Aun en la resolución de situaciones problemáticas abiertas, centran su atención en la decisión final más que en los procesos de razonamiento y argumentación que les permiten llegar a ella. Varios autores han explorado cómo repercuten estas tendencias en el aprendizaje de la Termodinámica de los procesos físicos y químicos (Papadouris y Constantinou, 2010; Sakschewski *et al.*, 2014).

En resumen, los alumnos suelen no proceder de manera analítica y elaboran razonamientos sobre la base de los hechos observables o sobre la memoria resultante de su experiencia cotidiana, lo que hace que utilicen ideas diferentes para interpretar cada fenómeno o situación específica, y que incorporen en sus respuestas el lenguaje cotidiano, lejano al deseable desde la ciencia escolar.

Conclusiones que se extraen de las recomendaciones didácticas y las propuestas y materiales de enseñanza elaborados por los investigadores hasta 2014

La primera conclusión que se extrae de la implementación y evaluación de las propuestas de enseñanza sobre la Termodinámica de los procesos químicos, es que la instrucción resulta poco efectiva a la hora de construir un aprendizaje significativo. De hecho, muchos estudiantes llegan a la Universidad con unas ideas bastante "difusas" sobre Termodinámica (Ochs, 1996), y el aprendizaje en los niveles superiores de la enseñanza está muy condicionado por las ideas alternativas que se desarrollaron en los cursos de primaria y secundaria (por ejemplo, Carson y Watson, 2002).

Una de las razones de la poca efectividad de la instrucción es el poco tiempo del que se dispone para afianzar unos conocimientos que son nuevos para el alumnado y cuya construcción supone un notable esfuerzo intelectual por parte de profesores y estudiantes. En 2º de Bachillerato, las pruebas de acceso a la Universidad condicionan drásticamente la temporalización y los contenidos del curso, y la realización de un aprendizaje significativo se hace todavía más difícil. Sin duda, las limitaciones de tiempo tienen relación con la escasa publicación de propuestas de enseñanza para este curso; pero también se observa una baja eficacia en propuestas con mayor desarrollo temporal.

Desde la perspectiva del diseño de las secuencias de actividades *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, tenemos presente que, para que se produzca un aprendizaje

significativo, los alumnos deben utilizar los nuevos conocimientos reiteradamente y situaciones lo más variadas posible, al tiempo que se recalcan la síntesis y conexión de los conocimientos nuevos con los ya trabajados. El número de supuestos planteados en las tareas ha de ajustarse de manera que sea suficiente para incluir diversos contextos y fenómenos, pero no tan excesiva como para que su implementación sea lenta y tediosa.

Revisando las características de los materiales de enseñanza que se han publicado, se observa que muchos se centran en la enseñanza y aprendizaje de un aspecto teórico, una magnitud termodinámica o un principio concretos (*Propuestas didácticas y materiales de aprendizaje publicados en el ámbito de la Termodinámica de los procesos químicos*, pág. 232). Nuestro propósito es incluir en las dos propuestas todos los contenidos conceptuales y procedimentales de 2º de Bachillerato sobre la Termodinámica de los procesos químicos, y apenas se encuentran precedentes de este tipo de investigaciones. De hecho, para los niveles de enseñanza preuniversitarios no encontramos ninguna secuencia completa dedicada a la Termoquímica o la Termodinámica Química.

Las propuestas de Teichert y Stacy (2002), diseñadas para el nivel universitario, tienen ciertas similitudes con las nuestras, porque una trata sobre la energía de enlace, otra sobre la espontaneidad de los procesos químicos, y en ambas se trabajó con los modelos de enlace y reacción química. De la unidad didáctica de Belt *et al.* (2005) destacamos el tema de las fuentes de energía, que ellos proponen tratar mediante la resolución de un único problema abierto a lo largo de ocho sesiones de clase; dado que nuestra pretensión es variar lo máximo posible el número de supuestos y contextos, optamos por desarrollar solamente una actividad de este tipo (combustibles), e incluir otras mediante las que abarcan contextos similares a los de Holman y Pilling (2004): el contexto personal, con las actividades sobre los óxidos del cabono y sobre valor energético de los alimentos; lo social y medioambiental, mediante la actividad sobre las menas de hierro y la pequeña secuencia sobre la piedra caliza; el contexto investigador, tratando sobre los explosivos, y los contextos investigador e histórico, que se desarrollan a través de una revisión sobre la síntesis de Haber y las reacciones metabólicas (*Descripción de las secuencias de actividades* Termoquímica *y* Termodinámica Química, pág. 474).

También se pretende integrar en lo posible algunos conocimientos procedentes de distintos ámbitos de la Ciencia, lo que es poco frecuente hasta la fecha, aunque en los últimos años algunas investigaciones comienzan a incluir actividades en las que se relacionan los aspectos teóricos de la Química con temas como la dinámica de los sistemas vivos y del planeta Tierra; la reciente línea de investigación sobre las progresiones de aprendizaje (*learning progressions*) parece bastante implicada en esta interrelación de áreas científicas. En las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* hay un buen número de actividades centradas en las reacciones químicas, pero también se trabaja sobre procesos físicos y biológicos. De éstos, hemos seleccionado los aspectos energéticos de la nutrición y del metabolismo de las células vivas, por tener una conexión directa con la adopción de hábitos saludables en la alimentación.

No se han diseñado actividades cuyas tareas sean demasiado sencillas o poco demandantes conceptualmente para alumnos de un curso preuniversitario: no se incluyen reglas mnemotécnicas ni entretenimientos mediante los que repasar o memorizar los conceptos y modelos objeto de aprendizaje. No se utilizan recursos visuales más allá de la elaboración de representaciones gráficas o dibujos que plasmen ideas de los modelos de partículas, enlace o reacción química. No hay actividades dedicadas la utilización de las TIC, porque dado el escaso tiempo del que se dispone en 2º de Bachillerato, consideramos que la instrucción sobre el manejo de *software* y las rutinas del trabajo con ordenador obligarían a desperdiciar varios minutos en cada sesión; además, no todos los Centros educativos disponen de suficientes recursos informáticos para trabajar de manera adecuada a este nivel de la enseñanza. Debido a las limitaciones de tiempo, tampoco se han desarrollado tareas relacionadas con la elaboración de mapas conceptuales, V de Gowin y otros instrumentos similares, que requerirían una instrucción previa para que los estudiantes se familiarizaran con las técnicas de construcción necesarias.

En *Termoquímica* y *Termodinámica Química* se incluyen actividades prácticas de laboratorio, y las "teóricas" o mentales proponen situaciones problemáticas lo más abiertas posible.

Las propuestas de enseñanza publicadas tienen un buen número de actividades en las que se plantean situaciones problemáticas y cuestiones abiertas, pero pocas hacen explícitos los modelos y estrategias didácticas que se han seguido en el diseño y planificación de las secuencias. En algunas se prioriza el análisis de las interacciones discursivas en el aula (Laburú y Niaz, 2002; Dumrauf y Cordero, 2004; Ribeiro Amaral y Mortimer, 2004), otras introducen la historia de la Ciencia como recurso didáctico (Pessoa y Castro, 1992; de Berg, 2008; de Berg, 1997; Lopes, 2009; Furió-Gómez, Solbes y Furió-Mas, 2007; Duprez, Méheut y Kermen, 2004), y son minoría las recurren a textos literarios de ciencia-ficción como recurso didáctico (Liberko, 2004; Viau y Moro, 2010; Zamorano *et al.*, 2011).

Hemos basado el diseño y la secuenciación de las actividades de nuestras propuestas en las fases de exploración, indagación y aplicación de Ollerenshaw y Ritchie, (1997). En consecuencia, las actividades de exploración se sirven de textos introductorios que plantean las tareas a realizar; los contenidos de las actividades de indagación se desarrollan mediante un texto en el que se recogen las principales ideas sobre las que versarán la intervención del profesor y el debate en el aula; y en las actividades de aplicación se vuelve a los textos breves para enunciar el hecho o fenómeno de interés y el contexto al que se transfiere, así como las tareas que se piden. La mayoría de las actividades tienen el propósito de trabajar de manera explícita las relaciones CTSA con el fin de construir un cuerpo coherente de conceptos, procedimentos y actitudes científicas y de reforzar el interés por las tareas propuestas y el estudio de la Ciencia. Este enfoque, además, pone de manifiesto la necesidad de tomar decisiones sobre problemas de base científica de interés personal y social.

En cuanto a las prácticas de laboratorio, desde los años 70 se insiste en la necesidad de integrar las experiencias en la enseñanza de la Termodinámica (Ogborn (1976). Sin embargo, apenas se han publicado propuestas didácticas que contengan actividades de este tipo, y en los años 90 los investigadores seguían manifestando su preocupación por esta carencia (Becu-Robinault y Tiberghien (1998).

Las actividades de laboratorio más difundas son las experiencias calorimétricas y los procesos redox en celdas galvánicas; también se han diseñado algunas simulaciones para la introducción de la Termodinámica estadística. Hay una unidad didáctica para el primer curso de Universidad (Read y Kable (2007) que está compuesta por una serie ecléctica de diez experiencias, cada una de las cuales se organiza en las fases de observación, discusión y explicación de los fenómenos.

Entre las recomendaciones para la realización de las actividades prácticas en Termodinámica, destacamos los consejos de Cortel Ortuño (1999) para que la experimentación no resulte económicamente gravosa o requiera demasiado esfuerzo y material de mantenimiento. Las actividades prácticas de la secuencia *Termoquímica* cumplen con las expectativas de coste económico reducido y mantenimiento sencillo y barato, porque tanto el material como las sustancias con las que se trabaja son de uso común.

Todos los alumnos realizaron las mismas experiencias, y las tareas se repartieron de manera equitativa. Éste es un eficaz método de control de una las variables intervinientes de la investigación (*Variables dependientes e intervinientes*, pág. 287). Además, con la asignación de las mismas prácticas y tareas se evitan problemas como los que describen Flores *et al.* (2005). Estos autores dividieron a los estudiantes en equipos de manera que cada equipo hacía un experimento distinto y, tras la intervención, hallaron que los alumnos habían focalizado su atención en la experiencia de su grupo, sin preocuparse por reflexionar sobre las demás.

De Vos y Verdonk (1986) afirman que la implementación de las actividades prácticas es una gran oportunidad para generar un diálogo entre el alumno/observador y el mundo natural que lo rodea. Proponen que, para aprovechar al máximo esta ocasión, las primeras actividades de las secuencias didácticas sobre Termodinámica incluyan experimentos sobre los efectos térmicos de las reacciones químicas. Las cuestiones teóricas se formularán a partir de las observaciones realizadas en el laboratorio y se responderán razonadamente a partir de la posterior construcción de conocimientos. En nuestras propuestas, hemos considerado que probablemente los alumnos no hayan desarrollado en los cursos pasados muchas destrezas y estrategias relacionadas con el diseño y la elaboración de experiencias. Así, la implementación de las actividades prácticas se programó para después de un ciclo de exploración, indagación y aplicación.

El principal objetivo de estas prácticas de laboratorio es que los estudiantes lleguen a realizar de manera lo más autónoma posible el diseño de varias experiencias

calorimétricas que pongan de manifiesto la utilidad de las leyes de la Termoquímica en la estimación teórica de variaciones de entalpía asociadas a procesos químicos que no se van a determinar experimentalmente. En realidad, las prácticas sobre calorimetría son una aplicación de las leyes de Termoquímica, pero nuestra pretensión es que los alumnos no las perciban como tal, sino como un método experimental válido para medir transferencias de energía gracias a la naturaleza de la entalpía como la función de estado del sistema cuya variación coincide con la cantidad de energía intercambiada por calor en condiciones de presión constante. Así pues, las prácticas de calorimetría se diseñaron como actividades de aplicación de los conocimientos relacionados con la naturaleza de la función *H*, antes de construir el significado de las leyes de la Termoquímica. Hasta cierto punto, los alumnos reconstruyen el trabajo de Lavoisier, Laplace y Hess, en el sentido de que extraen de las experiencias prácticas las leyes termoquímicas; pero con el conocimiento previo de la función de estado que hace posible la determinación de los *calores de reacción* a presión constante. No se trata de que los estudiantes emulen a los grandes científicos, sino de que extraigan de sus observaciones, razonamientos y argumentos algunas conclusiones útiles que generen nuevo conocimiento para la comprensión del mundo que les rodea.

Las experiencias que proponemos se han llevado a las aulas en más de una ocasión: autores como de Vos y Verdonk (1986) o Le Maréchal y El Bilani (2008) también las desarrollan, y otros, como Mills y Guilmette (2007), ofrecen variantes de la neutralización NaOH / HCl, sutituyendo el ácido clorhídrico por ácidos orgánicos como el láctico, el oxálico o el cítrico. Otras dos tareas prácticas recogidas por investigadores aparecen también en las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, bajo la forma de "experimentos mentales": los aspectos energéticos de los procesos de extensión y contracción de una banda elástica (Johnstone *et al.*, 1979; Read y Kable (2007) y los cambios de estado del agua en condiciones de presión reducida Read y Kable (2007).

Otro aspecto importante de nuestras propuestas didácticas también se recoge en varias de las secuencias de actividades publicadas. Se trata del desarrollo de modelos científicos relacionados con el dominio microscópico de la materia:

En general, las secuencias de actividades realizan una aproximación macroscópica a la Termodinámica, y los principales motivos parecen ser la pretensión de imitar el desarrollo histórico de la Termodinámica (Furió-Gómez *et al.*, 2007), y la omisión del tratamiento matemático complejo que se requiere en Termodinámica Estadística.

De acuerdo con el marco teórico de esta investigación, la enseñanza de las Ciencias debe fomentar en los estudiantes el desarrollo de una forma de pensar científica (Hodson, 1994; Duschl, 1997) que utilice el lenguaje, los símbolos y los modelos teóricos de la Ciencia. En este sentido, la enseñanza debe responder a la necesidad de que los alumnos comprendan y utilicen la modelización científica, porque los modelos son instrumentos muy potentes de representación de las teorías y, por tanto, de interpretación de la

realidad. Entre los modelos relacionados con la composición y comportamiento de la materia, los más útiles son, sin duda, los del dominio microscópico. Ponerlos en juego requiere formas de razonamiento avanzadas y cierta soltura en el manejo de conceptos de gran nivel de abstracción y demanda conceptual, pero las características psicoevolutivas del alumnado de 2º de Bachillerato permiten el aprendizaje de estos modelos, y las actividades de las secuencias ensayadas se han secuenciado de tal manera que la construcción de los modelos de partículas, enlace químico y reacción química sea escalonada (Castro, 1992).

Algunas aportaciones de la literatura sobre secuencias de enseñanza en Termodinámica utilizan modelos y analogías del dominio macroscópico. Desde nuestra perspectiva, descartamos la utilización de estos métodos, por tres razones:

En primer lugar, si se utilizan modelos macroscópicos para ayudar a construir relaciones conceptuales del modelo macroscópico, se tiende a generar interpretaciones enmarcadas en una Termodinámica Clásica que se fundamenta en una base fenomenológica *ad hoc*, sin justificación ni estructura conceptual coherente (Novak, 2003).

En segundo lugar, tampoco se debe olvidar que los estudiantes tienen bastantes dificultades para reemplazar los modelos concretos analógicos por los abstractos de la ciencia escolar (Gilbert y Osborne, 1980; Domínguez *et al.*, 1995; Harrison y Treagust, 2000a), y que suelen apoyar sus afirmaciones en observaciones o explicaciones macrofísicas; muchos no llegan a desarrollar una consciencia microscópica (Furió y Furió-Más, 2000) incluso después de varios cursos escolares, y algunos desarrollan una consciencia microscópica alternativa, macrocorpuscular (Talanquer, 2005), que se manifiesta en la atribución de características macroscópicas a las partículas microscópicas.

En tercer lugar, si desde el contexto escolar se propone el uso de analogías macroscópicas para explicar aspectos del mundo microscópico, se ofrece una visión completamente distorsionada del conocimiento científico y se refuerzan las tendencias alternativas hacia la consciencia macrocorpuscular.

Las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica química* se han diseñado de tal manera que ayuden a los alumnos a desarrollar modelos de partículas, enlace y reacción química útiles en la interpretación de los aspectos energéticos de los procesos naturales. El bagaje teórico de estos modelos se articula en el *Esquema referencial de razonamiento* ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos (ER5)*** (pág. 394). Las nociones microscópicas se introducen desde las primeras actividades de *Termoquímica*, y conforme el perfil de las tareas se hace menos descriptivo y más interpretativo, crecen en cantidad y complejidad las ideas sobre las partículas y sus interacciones, y sobre los cambios que se producen a escala microscópica durante los procesos físicos y químicos.

Las propuestas ensayadas incluyen, además de prácticas de laboratorio y el desarrollo de los modelos microscópicos a los que ya hemos aludido, algunas actividades en las que se utilizan recursos visuales. En concreto, en las actividades *Fp04* y *Fp13* se pide

a los alumnos que elaboren e interpreten diagramas en los que representen los intercambios energéticos sistema-entorno de dos o tres procesos químicos, con la finalidad de que comparen visualmente la cantidad de energía que se transfiere en cada caso.

Los investigadores suelen emplear los recursos visuales para uno de los dos propósitos siguientes: o bien como una herramienta de apoyo en la construcción de conocimientos procedimentales asociados a conceptos abstractos (con el objetivo de evitar que los aspectos cuantitativos de las cuestiones planteadas se reduzca a la manipulación de datos numéricos), o bien para construir el significado de algún concepto termodinámico. Nuestra utilización de los recursos visuales nos acerca al primero de estos dos enfoques, en línea con Pérez-Landazábal y Varela-Nieto (2006), que utilizan diagramas para ayudar a los alumnos a visualizar el calor como un proceso asociado a un cambio de estado termodinámico del sistema, y a conceptualizar los aspectos de cálculo como una manera más de representar los cambios energéticos.

Los recursos visuales más utilizados en la enseñanza de la Termodinámica son los diagramas *PV* y los diagramas entálpicos; las curvas de calentamiento o enfriamiento no son tan populares. Las secuencias de *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tratan la construcción e interpretación de los diagramas entálpicos como métodos gráficos para representar la cantidad de energía puesta en juego en las reacciones químicas, como ya han puesto de manifiesto Barker y Millar (2000) y Kind (2004a). En cuanto a la utilización de recursos visuales relacionados con la entropía, no se contemplan en ninguna actividad, porque el desarrollo de conceptos mecánico-estadísticos y cuánticos solamente tiene cabida en la secuencia de *Termodinámica Química*, y a nivel muy básico. Sí se recomienda que los alumnos expresen mediante el lenguaje pictórico sus ideas sobre las partículas y su energía y movimiento, con la finalidad de que las representaciones les ayuden en la verbalización de los razonamientos justificativos más abstractos.

Exigencias cognitivas de los contenidos implicados y capacidades psicoevolutivas del alumnado

Desde el modelo evolutivo, se pone el acento en la demanda cognitiva de los contenidos, y para analizarla recurrimos al estudio de Shayer y Adey (1986), basado en la teoría genética de Piaget, de la que se deriva la noción de estadio del desarrollo evolutivo.

Piaget y su escuela de Ginebra investigaron la génesis del conocimiento, y sobre la base de sus resultados y conclusiones elaboraron una epistemología con base empírica, la teoría genética. Según ésta, el que aprende lo hace a través de sus estructuras cognitivas, y la efectividad en la adquisición de conocimientos está condicionada por la disponibilidad de las estructuras cognitivas en los distintos momentos de la vida. El aprendizaje está condicionado, pues, por el nivel de desarrollo de las estructuras cognitivas, y se pueden diferenciar varios estadios de desarrollo evolutivo en función de la edad del estudiante.

A la hora de diseñar los *curricula* de Ciencias, muchos autores se han preocupado de concretar qué contenidos de las distintas materias se pueden trabajar en cada estadio

evolutivo. Autores como Duschl (1995) señalan que algunos de los proyectos que ponen demasiado acento en la adecuación del *curriculo* a la edad del alumnado, caen en una excesiva disminución de los niveles de contenido. No se trata de preescolarizar los niveles de enseñanza, sino de que los alumnos aprendan Ciencias en un programa adaptado a su nivel, sin desposeer éste de todo tipo de contenidos (Domínguez, 2000). En resumen, para adecuar las propuestas didácticas a las características psicoevolutivas del alumnado, consideramos que los contenidos se deben adaptar a las capacidades cognitivas que los alumnos ya poseen o son susceptibles de poner en juego. La adecuación de la demanda cognitiva de la materia al nivel de los estudiantes no es la panacea, como se concluye de la investigación de las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje: aun cuando el nivel de desarrollo cognitivo es adecuado para el aprendizaje de un nuevo concepto o modelo científico, en muchas ocasiones el aprendizaje no se produce. Esto demuestra la importancia del conocimiento previo del que aprende.

Para determinar en qué nivel de desarrollo cognitivo se encuentran los adolescentes de 17-18 años, se puede hacer uso de los resultados que obtuvieron Shayer y Adey (1986) al analizar las *Science Reasoning Tasks* (tareas razonadas en Ciencias). Según este estudio, la mayoría de los estudiantes entre los 17 y los 18 años podrían encontrarse entre los niveles concreto avanzado y formal inicial, aunque los autores advierten que cualquier situación propuesta para analizar las características del desarrollo cognoscitivo en la población de más de 16 años es puramente especulativa; algunos alumnos habrían alcanzado el estadio avanzado de las operaciones formales. Así pues, nuestras propuestas de enseñanza deberían adaptarse a las características propias de estos estadios.

Para adecuar los contenidos objeto de aprendizaje a las capacidades psicoevolutivas de los alumnos, se ha realizado un análisis de las exigencias cognitivas que demandan los contenidos conceptuales y procedimentales. Este análisis se basa en las Taxonomías para el Análisis del Currículo (T.A.C.) de Shayer y Adey (1986), en las que se analizan las dificultades de un amplio conjunto de conceptos, modelos y destrezas en relación con los distintos niveles de desarrollo evolutivo. No se olvidan los contenidos procedimentales implicados, que tienen unas determinadas exigencias cognitivas implícitas que será necesario hacer explícitas antes de la intervención en el aula.

Partiendo de la hipótesis de que los estudiantes a los que van dirigidas las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* se encuentran mayoritariamente entre los estadios concreto avanzado y formal inicial del desarrollo evolutivo, las TAC relacionadas con nuestras propuestas didácticas son las siguientes:

- **Sobre la conservación:** aceptan la conservación de la materia y de la energía.
- **Sobre el calor en las reacciones químicas**: Pueden llegar a comparar las variaciones de energía asociadas a una reacción química midiendo el calor involucrado, para cantidades equimolares. Relacionan la energía puesta en juego en una reacción química con la atracción entre las partículas del sistema, y la

magnitud de los intercambios energéticos con la cantidad de sustancia (ya desde el estadio concreto avanzado).

- **Sobre el uso de modelos**: Suelen considerar los modelos como algo verdadero, no hipotético; por ello, es fundamental incidir en el aspecto funcional de los modelos científicos y en la comparación de modelos alternativos. En las unidades didácticas se trabajará con modelos de partículas, enlace y reacción química para analizar los aspectos energéticos de los procesos químicos. En el estadio formal inicial, los alumnos pueden considerar la existencia de múltiples causas para un solo efecto y de múltiples efectos producidos por una causa, y utilizan como explicación modelos formales, aunque de estructura simple.

- **Sobre los cálculos matemáticos y la interpretación de gráficas**: Pueden realizar cálculos relacionados con experiencias calorimétricas ya en el estadio concreto avanzado, trabajando con las operaciones elementales. También utilizan relaciones algebraicas sencillas, aunque no sean capaces de deducirlas. Elaboran interpretaciones a partir de relaciones gráficas. En el estadio formal inicial, hacen interpretaciones de las relaciones entre variables en una gráfica; en el estadio concreto avanzado, interpretan escalas y gráficas si en ellas existe una correspondencia de 1:1 con el objeto representado.

- **Sobre la relación entre variables y el control de variables**: Usan con facilidad la noción de reversibilidad. Elaboran argumentos de compensación para explicar la conservación para una sola variable independiente (estadio concreto avanzado) o para dos variables independientes (formal inicial). Las relaciones directas entre dos variables y las relaciones de causa-efecto sencillas (aumento de presión $\rightarrow$ disminución de volumen...) no presentan dificultades. Suelen necesitar ayuda para deducir el comportamiento de un sistema con múltiples variables, y las deducciones tienden a ser sólo cualitativas.

  Por tanto, en las actividades es aconsejable plantear por separado la relación entre una variable dependiente con cada una de las variables independientes, y trabajar preferentemente con relaciones cualitativas antes de desarrollar las cuantitativas. En la resolución de problemas multivariable, puede que se haga necesario ayudarles a elaborar estrategias para excluir alguna variable.

- **Sobre las destrezas de investigación**: En el estadio formal inicial, pueden utilizar un modelo formal en la investigación de relaciones empíricas, así como plantear la formulación de hipótesis y el diseño de experimentos sencillos para controlar algunos factores explícitamente citados. En el estadio concreto avanzado, necesitan que se les proporcione un modelo concreto para estructurar los resultados experimentales. Aunque es posible que necesiten apoyo para realizar inferencias, deducir relaciones entre datos y organizar la información, Shayer y Adey (1986) recomiendan que se promueva la reflexión sobre los resultados experimentales.

Partiendo de ella, los alumnos serán capaces de decidir entre varios razonamientos justificativos de tipo causa-efecto. En todo caso, se trabajará a partir de cuestiones concretas que dirijan el análisis de los datos (experimentales o teóricos).

- **Sobre el equilibrio de los sistemas**: Cuando en el equilibrio hay dos variables independientes relacionadas entre sí, descubrirán la relación, siempre y cuando se trate de números enteros. En el estadio concreto inicial, las relaciones se conceptualizan sólo cuando cada vez se manejan dos variables, que deben estar en relación lineal directa o inversa.
- **Sobre la profundidad de interpretación de pasajes descriptivos**: Los alumnos recogen varios aspectos de la situación descrita, pero tal vez separadamente. Al relacionar causas y efectos, en el estado formal inicial pueden considerar más de un aspecto simultáneamente, aunque les resulta más fácil trabajar los pares separadamente, en secuencia lineal. En el estadio concreto los alumnos son capaces de razonar sobre lo real, mientras que los del nivel formal razonan además sobre lo posible (del Val, 1991): en el primer caso, el razonamiento se debe apoyar en experiencias concretas, mientras que en el segundo se puede prescindir de ellas y partir solamente de enunciados hipotéticos. Los modelos explicativos son más propios del pensamiento formal que del concreto.
- En cuanto a la investigación experimental (del Val, 1991), los estudiantes del nivel concreto tienen dificultades en la resolución de cuestiones en las que hay más de una variable dependiente, porque, al buscar las relaciones entre las variables, todavía no sienten la necesidad de ir cambiando de cada vez una de ellas para ver su influencia en el comportamiento de las demás; en el nivel formal del desarrollo evolutivo, sí son capaces de controlar variables. Las relaciones que se manejan en el estadio concreto son preferentemente cualitativas, mientras que en el formal ya se trabaja con las cuantitativas.
- En cuanto a la resolución de problemas, en el nivel concreto se prefieren los problemas cerrados (única solución). Los alumnos del nivel formal tienen la capacidad de resolver problemas abiertos, con varias alternativas a explorar.

TAREA 3.- Selección y formulación de los objetivos de aprendizaje

En la tercera tarea del diseño y planificación de unidades didácticas, se hacen explícitos los objetivos de aprendizaje (*Tabla 11*, pág. 447) que se derivan de la integración de los análisis científico y didáctico. Los criterios de selección y formulación atienden a las capacidades (incluyendo destrezas, estrategias y actitudes) que se espera que los alumnos alcancen por el proceso de aprendizaje. Los objetivos constituyen la guía para perfilar y secuenciar las actividades de las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, así que para su selección debe tenerse en cuenta que se puedan desarrollar en un número limitado de actividades: quince para *Termoquímica* y dieciséis para *Termodinámica Química*.

Integrando el análisis científico y el análisis didáctico, se extraen algunas consecuencias inmediatas:

- Los conceptos fundamentales de las propuestas de enseñanza giran alrededor de los balances energéticos sistema-entorno (*Termoquímica*) y de la espontaneidad de los procesos químicos (*Termodinámica Química*):
- Se espera que los alumnos reconozcan las magnitudes termodinámicas básicas (temperatura, presión, volumen), y que hayan trabajado en cursos pasados con las nociones de calor y trabajo; pero es posible que no hayan desarrollado su significado científico en relación con la variación de energía de un sistema, y que tampoco asocien las transferencias de energía (calor y trabajo) con las variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas del sistema. Se expresará la necesidad de describir los sistemas materiales mediante variables que son función del estado, y la conveniencia de realizar un balance de las transferencias energéticas de manera que se expresar mediante la variación de una función de estado: la energía interna.
- Se presentará el primer principio de la Termodinámica y su relación con la conservación de la energía en las transformaciones naturales.
- Por lo que se refiere a los intercambios energéticos de un sistema químico con su entorno, se introducirá la variación de entalpía como la función de estado del sistema que permite calcular la cantidad de energía transferida por calor en un proceso que sucede a presión constante; el resultado del balance energético (la exotermia o endotermia del proceso) se asociará al signo de la variación de entalpía del sistema. La necesidad de disponer de datos de ΔH de reacciones químicas para conocer de antemano sus características energéticas llevará a la presentación de las técnicas calorimétricas como los procedimientos experimentales que hacen posible la construcción de tablas de datos termodinámicos, en las que se recogen los valores de las mangitudes termodinámicas asociadas a los procesos químicos de interés.
- En relación con la naturaleza de la entalpía como función de estado del sistema, se construirá el significado de las leyes de la Termoquímica, cuya aplicación hace posible la determinación de los intercambios energéticos asociados a reacciones cuya realización experimental sea difícil o imposible.
- Se pretende que los estudiantes lleguen a predecir el sentido de las transferencias energéticas de un proceso químico sobre la base de la naturaleza química de los reactivos y los productos. Para que lleguen a hacerlo, hay que pasar de la mera descripción de los hechos y fenómenos, y hacer surgir la necesidad de elaborar razonamientos justificativos sobre los procesos naturales. Estos razonamientos se fundamentan en los modelos de partículas, enlace y reacción química, que permiten explicar y predecir las variaciones de energía como una consecuencia

macroscópica de los cambios que se producen en las interacciones entre las partículas. Se crea así una integración de conocimientos procedentes de los dominios macroscópico y microscópico:

- La idea macroscópica central es descriptiva: los sistemas materiales tienen energía, y pueden transferirla mediante los procesos de calor y trabajo. Durante un proceso físico o químico, el estado del sistema cambia, y se producen intercambios de energía con el entorno. El balance energético que se establece entre el sistema y su entorno puede resolverse en exotermia o endotermia (liberación neta o absorción neta de energía por parte del sistema).
- La interpretación microscópica permite construir un razonamiento justificativo de los cambios que experimenta el sistema: los sistemas materiales están compuestos por partículas dotadas de energía, y la contribución total de las energías microscópicas es la energía interna del sistema. Las partículas se encuentran en continuo movimiento, y establecen interacciones entre ellas. Cuando tiene lugar un proceso, las partículas modifican sus interacciones. La ruptura de una interacción estable requiere energía, y la formación de una interacción estable libera energía. El cómputo total de estos intercambios microscópicos entre las partículas del sistema determinan que el sistema, en su conjunto, absorba energía del entorno o la ceda. En el primer caso, el entorno cede parte de su energía al sistema, que incrementa su temperatura (endotermia); en el segundo caso, el entorno recibe una cantidad neta de la energía del sistema, con lo que éste dismiuye su temperatura (exotermia).
- Hasta aquí, el desarrollo de los conceptos y modelos relacionados con la Termoquímica. Llegados a este punto, comienza el desarrollo de la secuencia *Termodinámica* Química, mediante la cual se hace explícita la idea de que el balance energético de los procesos naturales no ayuda a predecir si en qué condiciones tendrán lugar: numerosos procesos exotérmicos suceden de manera natural. Se construirá el concepto de la espontaneidad de los procesos en relación con el sentido de los mismos, y la entropía se presentará como una nueva función de estado del sistema que permite estudiar la evolución microscópica de los sistemas, al cuantificar el grado de desorden termodinámico: la energía disponible tiende a dispersarse entre todas las partículas, y cuanta más energía haya, mayor es el número de distribuciones energéticas posibles.
- Los principios segundo y tercero ayudan a elaborar un marco teórico más completo de las posibilidades de las transferencias energéticas entre un sistema y su entorno. Las perpectivas macroscópica y microscópica se complementan:

  El segundo principio establece que todo proceso tiene asociadas unas transferencias energéticas incontrolables que se producen por calor e impiden lograr un rendimiento del 100% para cualquier sistema y proceso; ésta es la

descripción macroscópica, termodinámica. El responsable microscópico de esta tendencia observable es el desorden termodinámico: las partículas disipan parte de su energía mediante movimientos que no se traducen en procesos de trabajo (macroscópico), sino en calor (microscópico), con lo cual no toda transferencia microscópica de energía se traduce en un "rendimiento" macroscópico.

Según el tercer principio, los procesos físicos y químicos solamente se detienen en la temperatura inalcanzable de los 0 K (cero absoluto). Éstas son las condiciones en las que las partículas de un sistema ven minimizadas sus probabilidades de distribución energética, así que un sistema puro alcanzaría el orden energético (y, por tanto, espacial) perfecto, y las interacciones entre partículas dejarían de ser procesos dinámicos. Al no producirse cambios en las interacciones entre partículas, por carecer éstas de energía, todo proceso se detiene en el 0 K.

- Se hará explícita la idea de que para predecir la espontaneidad de los procesos utilizando la entropía, se necesita analizar el entorno además del sistema (disipación de la energía). Así se introduce la necesidad de formular una nueva función de estado, la energía de Gibbs, mediante la que se obvie el estudio del entorno (a temperatura y presión constantes). Se construirá el significado macroscópico de la variación de energía de Gibbs como la cantidad de energía útil del sistema, esto es, la cantidad de energía de la que dispone el sistema para continuar evolucionando. A lo largo de cualquier proceso, la energía de Gibbs decrece hasta que se anula, momento en el que deja de haber energía disponible para continuar impulsando a nivel apreciable los cambios microscópicos en las interacciones del sistema. Se alcanza entonces el estado de equilibrio, aparentemente estático desde el punto de vista macroscópico, pero dinámico en lo microscópico, porque las partículas están dotadas de energía y los procesos de ruptura y formación de enlaces continúan, aunque ya no se producen de manera masiva y por tanto no son observables.

- La relación entre las variaciones de entalpía, entropía y energía de Gibbs se plasman en la ecuación fundamental de la Termodinámica, que expresa el balance de la energía útil del sistema como el resultado de descontar, al total de energía transferida por el sistema (término entálpico), las contribuciones incontrolables por calor (término entrópico), en condiciones de temperatura y presión constantes.

- Muchos de los contenidos conceptuales que serán objeto de aprendizaje tienen un alto nivel de abstracción, y ha de tenerse en cuenta que los estudiantes suelen detenerse en la descripción de aspectos perceptibles y en la narración de los rasgos observables de los procesos. Mediante las actividades, se les plantearán situaciones, hechos y fenómenos que faciliten el paso de las descripciones operacionales, macroscópicas de los cambios sucedidos en los sistemas, hacia los razonamientos interpretativos que permiten justificar y predecir dichos cambios.

- Respecto de la comunicación de resultados, los alumnos han de desarrollar destrezas de representación matemática de cantidades de magnitud, utilizar las operaciones algebraicas y elaborar e interpretar representaciones gráficas. Se considera necesario que lleguen a inferir conclusiones a partir de las regularidades que encuentren en las gráficas y de los resultados numéricos de las variaciones de las magnitudes termodinámicas. Se enfatizará en la comunicación de los datos, pues los estudiantes tienden a no sentir la necesidad de indicar las unidades de las magnitudes y de analizar la información teórica que proporcionan las cantidades por su relación con las correspondientes unidades. También pueden aparecer problemas en la inferencia de conclusiones a partir de las representaciones gráficas, aunque se espera que la elaboración de gráficas sea una técnica ya dominada; se pondrá especial cuidado de reforzar aquellos aspectos que los alumnos hayan olvidado o interpretado según ideas alejadas de la ciencia escolar.
- En cuanto al lenguaje utilizado, es necesario tener en cuenta que el alumnado tiende a utilizar términos cotidianos en sus descripciones e interpretaciones, y que abundan las expresiones ambiguas y equívocas. Se introducirá el léxico científico y se evitará la polisemia del lenguaje cotidiano, que puede afianzar ideas alternativas. Se supervisará que las expresiones sean gramaticalmente correctas.
- Los alumnos deben elaborar razonamientos que justifiquen sus respuestas (activación de esquemas de razonamiento) y deben desarrollar destrezas y técnicas (activación de esquemas de acción). Debe hacerse explícita la naturaleza del conocimiento científico como un marco referencial que integra conceptos y procedimientos, al que se puede acudir para un mejor entendimiento del mundo.
- Consideramos que es necesario que primen las actividades de indagación (Domínguez, 2000), en las que los estudiantes tengan que verificar o refutar hipótesis a partir de datos, ya sean proporcionados por el profesor, obtenidos de tablas de valores u otras fuentes de información, o bien obtenidos por ellos mismos mediante experiencias de laboratorio. Es especialmente importante que sean capaces de diseñar experiencias que les lleven a comprobar las relaciones teóricas sobre las que hipotetizan. En el diselo de las experiencias juega un papel fundamental el control de variables, y las actividades se diseñarán de tal manera que planteen, a ser posible, sólo dos variables de cada vez (una independiente y otra dependiente), para facilitar el establecimiento de la relación entre ambas (Domínguez Castiñeiras, 2001). En la realización de las experiencias de laboratorio se trabajarán las destrezas manipulativas, guardando en todo momento las medidas de seguridad e higiene y asegurando el cuidado del material, así como el rigor y la sistematicidad en la recogida de los datos experimentales.

Se hacen explícitos los objetivos de aprendizaje que se derivan de la integración de los análisis científico y didáctico:

Tabla 11: objetivos de las secuencias didácticas ensayadas

Objetivos de la secuencia de actividades *Termoquímica*

Identificar los conceptos termodinámicos de sistema y entorno, y dar significado al concepto de función de estado. Describir al sistema objeto de estudio a través de variables termodinámicas función de estado del mismo.

Identificar y describir, mediante los conceptos de calor y trabajo, las transferencias energéticas en los sistemas que experimentan transformaciones.

Construir el significado de la energía interna como función de estado extensiva de los sistemas materiales, relacionada con los movimientos moleculares y las interacciones intermoleculares. Relacionar las variaciones de la energía interna de un sistema con las transferencias de energía (calor, trabajo) producidas en el transcurso de un proceso termodinámico.

Relacionar el primer principio de la Termodinámica con la conservación de la energía en los sistemas materiales.

Construir el concepto de entalpía como función de estado extensiva de los sistemas materiales. Conocer la equivalencia entre la variación de entalpía de un sistema cerrado en un proceso termodinámico a presión constante, y la energía transferida por calor durante el proceso. Relacionar la variación de entalpía de un sistema con la variación de energía interna del mismo.

Justificar la endotermia / exotermia de las reacciones químicas en términos de variación de energía interna y de variación de entalpía del sistema.

Reconocer los métodos calorimétricos y su utilidad.

Dar significado a las leyes de la Termoquímica (ley de Hess y ley de Lavoisier-Laplace), y relacionarlas con el establecimiento de ciclos de ecuaciones termoquímicas para facilitar el estudio energético de las reacciones químicas.

Adquirir destrezas relacionadas con la representación de los aspectos energéticos de las reacciones químicas, mediante las ecuaciones termoquímicas y los diagramas entálpicos.

Adquirir destrezas relacionadas con la selección y la interpretación de los datos termodinámicos tabulados y su manipulación algorítmica a partir de las ecuaciones termoquímicas y los ciclos termoquímicos.

Justificar las variaciones de entalpía de los sistemas químicos mediante un razonamiento fundamentado en los modelos cinético molecular, de enlace químico y de reacción química.

Objetivos de la secuencia de actividades *Termodinámica Química*

Construir el significado de la espontaneidad de reacción en relación con el sentido de evolución de los sistemas químicos.

Justificar la utilidad de la función de estado entropía para el estudio de la evolución de los sistemas químicos.

Dar significado macroscópico y microscópico al concepto de entropía.

Interpretar los principios segundo y tercero de la Termodinámica.

Construir el concepto de energía de Gibbs como función de estado extensiva que proporciona una condición de espontaneidad y equilibrio para los sistemas químicos. Relacionar la variación de la energía de Gibbs con el trabajo útil y con las variaciones de las funciones de estado entalpía y entropía.

Reconocer los criterios de espontaneidad de reacción referidos al universo (variación de la entropía del universo) y al sistema (variación de energía de Gibbs del sistema).

Desarrollar estrategias para obtener información sobre la espontaneidad de las reacciones químicas, interpretando datos termodinámicos de acuerdo con razonamientos fundamentados en los conceptos y los principios termodinámicos.

El hecho de que se haga explícita esta relación de objetivos no implica que nuestra intención educativa se reduzca a la enseñanza de contenidos exclusivamente conceptuales y procedimentales. Desde las distintas perspectivas constructivistas, se insiste en la visión integradora de los tres tipos de contenidos que componen el conocimiento científico, y en consecuencia nuestras propuestas de enseñanza pretenden fomentar una educación estimuladora de todas las capacidades del alumnado; entre ellas, también las actitudes a las que nos hemos referido en la *Tabla 9* (pág. 318). El razonamiento y la argumentación deben promoverse como destrezas cognitivas fundamentales para el aprendizaje significativo conceptos, modelos y procedimientos científicos, y de actitudes y valores.

TAREA 4.- Selección de las estrategias de instrucción

Las dos propuestas de enseñanza ensayadas se han organizado en las fases de exploración, indagación y aplicación de Ollerenshaw y Ritchie (1997), que ya se han explicado en la *Tabla 1* (pág. 70), siguiendo las directrices que se exponen en *Fundamentos de la metodología*, pág. 290).

En cuanto a los materiales de trabajo, para la presentación y el desarrollo de las actividades se diseñaron los guiones de trabajo del alumnado, cuyas características se han comentado en el apartado *Los instrumentos de trabajo* (pág. 306).

TAREA 5.- Selección de las estrategias de evaluación del aprendizaje

La quinta tarea del diseño, planificación y desarrollo de las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y sobre Termodinámica Química consiste en la presentación de las estrategias que se seleccionaron para evaluar el aprendizaje generado por la interacción de los alumnos con la metodología ensayada. Dada la amplitud de esta tarea, se desglosa en dos apartados:

En el primer apartado, se describen *Instrumentos y estrategias de recogida y tratamiento de la información* (pág. 449) con los que se realizó el seguimiento del proceso de aprendizaje que tuvo lugar durante las fases experimentales de la investigación. Se describen los procesos mediante los cuales se tomaron, seleccionaron, redujeron y categorizaron los datos para poder someterlos a análisis.

En el segundo apartado se exponen los *Instrumentos y estrategias de análisis y evaluación del aprendizaje* (pág. 455), gracias a los cuales se han obtenido los resultados de la investigación (ver ***Volúmenes B***, ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII***). Este apartado se divide a su vez en dos, para describir por separado la construcción de los dos métodos de análisis: por esquemas de conocimiento y por competencias.

Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento (pág. 456). La información contenida en los datos se dimensionó en esquemas de razonamiento y acción deseables (referenciales), lo que permitió a los investigadores identificar las estructuras del conocimiento construido por los alumnos y analizar su evolución con respecto a las dimensiones establecidas, evitando la replicación de las pruebas.

Evaluación del aprendizaje por competencias (pág. 458). También se elaboraron las competencias referenciales, lo que permitió identificar las competencias idiosincrásicas que demostraron los estudiantes en los distintos momentos de aprendizaje, y estimar cómo éstas progresaron hacia las deseables desde la ciencia escolar.

Instrumentos y estrategias de recogida y tratamiento de la información

En esta Tesis se pretende averiguar cómo se modificaron las formas de pensar y hacer de los alumnos de un grupo de 2º de Bachillerato, como resultado de la implementación de las propuestas de enseñanza ensayadas. Mediante las estrategias que se detallan en el apartado siguiente (*Instrumentos y estrategias de análisis y evaluación del aprendizaje*, pág. 455), se pretende evaluar el aprendizaje generado por la interaccción de los estudiantes con las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química*. A la hora de perfeccionar, corregir o reformular éstas, es interesante disponer de herramientas que permitan reflexionar sobre la acogida que han tenido la nueva metodología y las actividades en cuanto al interés, la motivación, la participación, la cooperación y la autonomía de los estudiantes. Por otra parte, las estrategias de evaluación pueden proporcionar información sobre determinados aspectos metodológicos, como la adecuación de las tareas a las características del alumnado y a la temporalización prevista;

también es útil que faciliten la exploración de las redes de interrelaciones que se generaron durante el trabajo de aula.

En *Termoquímica* y *Termodinámica Química*, se propone una evaluación formativa integrada en el proceso de aprendizaje. Así pues, las estrategias seleccionadas deben permitir un seguimiento continuo de la construcción de conocimiento, y para la recogida de información se utilizan herramientas personalizadas en función del alumnado. Si la evaluación se basa en el seguimiento continuado de las manifestaciones orales y escritas y de las acciones de los estudiantes, los guiones de trabajo constituyen un interesante material de evaluación tanto para los propios alumnos (autoevaluación), como para el profesor y los investigadores. Mediante esta estrategia se cuantifica en qué medida la intervención en el aula es capaz de generar progresos significativos en el conocimiento de los integrantes de la muestra, y permite comprobar hasta qué punto los alumnos son conscientes de su propio aprendizaje: la reflexión sobre sus propias observaciones, hipótesis y argumentos ayuda a que se planteen una valoración general más allá de la evolución de sus ideas, y a que perciban la utilidad del lenguaje científico y la importancia de los constructos de la Ciencia, de la abstracción y de la teorización. El conflicto entre el poder explicativo de las teorías científicas y sus limitaciones ayudará a implicar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje, y a que valoren de manera crítica y responsable de los métodos y las actitudes científicas, industriales y, en definitiva, sociales.

En esta investigación, los guiones de trabajo ayudaron al profesor colaborador, Rodrigo, a recabar valiosa información sobre la evolución de las ideas de los alumnos y sobre el grado de consecución de los objetivos de aprendizaje, y sirvieron a los investigadores para la finalidad evaluativa que se pretendía en lo que respecta al conocimiento generado, el funcionamiento de las propuestas ensayadas y la acogida de la metodología en las diferentes situaciones de aprendizaje.

Las actividades de aplicación son especialmente interesantes para obtener datos sobre la evolución de las ideas de los estudiantes y sobre su relación con la consecución de los objetivos. Como estas actividades están diseñadas de manera que el alumnado transfiera sus conocimientos a la explicación de nuevos hechos y fenómenos, su evaluación permite comprobar cómo y hasta qué punto los que aprenden hacen significativo el nuevo conocimiento en la resolución de cuestiones de base científica.

Desde distintos ámbitos de la investigación, entre ellos la Filosofía de la Ciencia, la Psicología y la Didáctica de las Ciencias, se acepta que el conocimiento científico no consiste en una serie de ideas aisladas, sino que es funcional e integrador, y articula conceptos y modelos, procedimientos y actitudes. Existe una interrelación entre los marcos teórico y metodológico, y las actitudes se fundamentan en factores cognitivos y experienciales. De acuerdo con este marco teórico, el aprendizaje es un proceso de construcción del conocimiento que supone una modificación de estructuras de pensamiento. Un auténtico aprendizaje supone el establecimiento de estructuras de

razonamiento útiles en la interpretación de fenómenos, hechos y acontecimientos; y de estructuras de acción, en las que se integran las técnicas y destrezas necesarias para hacer objetivos los datos, además de las estrategias que permiten contrastar hipótesis y resolver problemas (Domínguez Castiñeiras, 2000).

El diseño experimental de la investigación exige caracterizar el conocimiento conceptual y procedimental en situaciones de aprendizaje diferentes y alejadas en el tiempo (antes, inmediatamente y un cierto tiempo después de la intervención), así que requiere instrumentos y métodos de análisis que permitan comparar datos procedentes de *tempus* distintos. Teniendo en cuenta la complejidad del proceso de aprendizaje y la influencia del contexto en el desarrollo y la integración de los factores cognitivos y sociales, se han caracterizado las estructuras de pensamiento subyacentes al discurso de los estudiantes, se han identificado aquéllas que utilizaron en sus explicaciones y se ha analizado cómo cambiaron a lo largo de la intervención. El análisis comparativo de las estructuras de pensamiento correspondientes a los distintos *tempus* ofrece información sobre la evolución en el conocimiento durante la intervención en el aula, y permite medir la estabilidad en el tiempo (significatividad) del aprendizaje promovido.

Los criterios de evaluación, que se recogen en la *Tabla 12*, se extraen del DCB para 2º de Bachillerato (MEC, 2007; XUGA, 2008).

Tabla 12: criterios de evaluación para las dos propuestas de enseñanza ensayadas

Criterios de evaluación para la secuencia de actividades *Termoquímica*

Identificar, desde el punto de vista termodinámico, el sistema y su entorno, y las posibles transferencias de materia y energía entre ambos.

Conocer las variables termodinámicas que describen el estado de los sistemas materiales, y describir la evolución de los mismos entre un estado inicial y un estado final a través de un camino termodinámico.

Explicar las contribuciones cinética, potencial e interna a la energía total de un sistema material.

Comprender el principio de conservación de la energía mecánica y sus implicaciones para el estudio de los sistemas químicos.

Conocer el significado de la entalpía de un sistema.

Explicar las leyes de la Termoquímica, su ámbito de validez, sus limitaciones y consecuencias. Calcular variaciones de entalpía asociadas a procesos químicos, sobre la base de las leyes de la Termoquímica.

Determinar por métodos calorimétricos la variación de entalpía asociada a un proceso químico.

Criterios de evaluación para la secuencia de Termodinámica Química

Reconocer los criterios de espontaneidad referidos al universo (variación de entropía) y al sistema (variación de energía de Gibbs).

Predecir, con los conceptos de entropía y energía de Gibbs, la posibilidad de que un proceso tenga lugar en determinadas condiciones.

Criterios de evaluación comunes a ambas secuencias

Analizar situaciones y obtener, valorar y representar información sobre fenómenos termodinámicos, utilizando las estrategias básicas del trabajo científico.

Describir, analizar y predecir científicamente situaciones, hechos y fenómenos sobre la Termodinámica de las reacciones químicas.

Conocer y valorar las implicaciones de los aspectos energéticos de los procesos químicos sobre la salud, la economía y el medio ambiente. En particular, interesan la relación entre el uso de combustibles fósiles y el incremento del efecto invernadero y el cambio climático actual.

Los datos de la investigación se extrajeron de varias fuentes:

Para analizar el aprendizaje promovido durante las fases previa y de intervención, nos hemos basado en las manifestaciones escritas de los estudiantes (contenidas en sus materiales de trabajo) y en las manifestaciones orales, resultado del trabajo en pequeño grupo y en grupo de clase, dentro de una dinámica de trabajo que permitió realizar un seguimiento experimental continuo sin interferir en el proceso de aprendizaje. En resumen, los datos de esta investigación son, en su mayoría, de tipo textual, y se extrajeron del contenido de los guiones de trabajo del alumnado. Para completar la información, se revisaron las grabaciones del registro videográfico y de audio de la intervención en el aula, con el fin de obtener manifestaciones orales que ayudaran a interpretar las ideas recogidas en los materiales escritos.

La observación del desarrollo de las clases fue directa, y la investigadora estuvo presente en todo momento. No se utilizaron unidades de análisis específicas para la observación, porque se pretendía analizar las actitudes y la participación del alumnado en el trabajo de aula, y comprobar la coherencia entre las manifestaciones orales y las escritas. La investigadora adoptó el papel de una observadora y registró diariamente las incidencias de clase mediante herramientas tecnológicas (en vídeo y audio) y anecdóticas (tomando notas de campo sobre los eventos de mayor interés y el papel del docente y los alumnos); además, se reunió con el profesor colaborador después de las sesiones de clase.

Por otro lado, se analizaron las respuestas escritas de los estudiantes a las pruebas de caracterización inicial, final y de retención. A la hora de programar las baterías de

caracterización que consideramos pertinentes para valorar los conocimientos en diferentes momentos de aprendizaje, se tuvo en cuenta que los alumnos serían conscientes de que las pruebas se utilizarían en la evaluación de sus ideas en momentos clave. Para que no se agobiaran ante la idea de enfrentarse a varios exámenes (lo que podría desvirtuar nuestro empeño por hacerles percibir la importancia de su esfuerzo diario), pero al mismo tiempo se esforzaran por responder con seriedad a las pruebas, recomendamos al profesor que las presentara como actividades complementarias a las realizadas en clase, que servirían para refinar la evaluación académica, basada en el trabajo de aula.

El desarrollo de las caracterizaciones no se grabó en audio y vídeo, porque se pretendía reforzar la percepción de que las baterías de pruebas eran simulacros de control escrito que no estaban sometidos a una observación tan rigurosa como un examen de evaluación. Las pruebas fueron diseñadas por los investigadores, y aplicadas, al igual que las actividades de las secuencias de enseñanza, en horario lectivo de la materia de Química. No se prohibió expresamente a los alumnos que intercambiaran impresiones, aunque sí se les pidió que respondieran a las cuestiones de manera individual. Tanto la investigadora como el profesor colaborador observaron el desarrollo de las tareas. El docente intervino para solucionar las dudas que se pudieran presentar, y la investigadora tomó nota de las interacciones que se produjeron con el profesor y entre los estudiantes.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos afirmar que esta estrategia de obtención de la información ha tenido éxito por dos motivos fundamentales: en primer lugar, porque los alumnos respondieron a las pruebas de caracterización en la misma medida que a las actividades de las secuencias de enseñanza y al examen tradicional; en segundo lugar, porque el profesor colaborador ha adoptado con gran interés esta estrategia de recogida de información para la evaluación en sus clases de Ciencias.

También se obtuvo información a partir de las entrevistas realizadas a los alumnos al finalizar la instrucción: se les pidió que clarificaran el significado de algunas manifestaciones escritas cuya redacción era demasiado escueta o poco comprensible. Las entrevistas fueron semiestructuradas y se realizaron de manera directa mediante un diálogo entre la investigadora y cada uno de los estudiantes por separado. Se presentaron como una encuesta opcional cuyo objetivo era recabar las opiniones de los alumnos sobre la metodología, los materiales de aprendizaje y las actividades planteadas. Fueron grabadas en audio. Para completar la información sobre las actitudes hacia el aprendizaje en general y de las Ciencias en particular, así como sobre los hábitos de estudio de los alumnos de la muestra, también se realizaron entrevistas a los padres y profesores que expresaron su conformidad. La duración de cada entrevista rondó los 30 minutos.

Para realizar los análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, se sistematizó la información contenida en las manifestaciones orales y escritas. Las respuestas de los estudiantes a cada *item* se vaciaron y se redactaron en forma de proposiciones que se volcaron en las tablas de análisis *item* a *item*. El análisis *item* a *item* ha

servido como protocolo para extraer los datos que permitieron elaborar los esquemas de razonamiento y acción idiosincrásicos de los estudiantes, y para sistematizar la elaboración de las tablas de los ***elementos de la competencia***.

El volcado de la información en las tablas de análisis *item* a *item* se realizó mediante la siguiente estrategia:

- Se identificaron las relaciones conceptuales que constituyen los razonamientos utilizados y caracterizan las estrategias de acción que demostraron los estudiantes en sus respuestas. Estas proposiciones son las unidades del análisis *item* a *item*.
- Las relaciones identificadas se organizaron en varias categorías que facilitan la evaluación de los conocimientos puestos en juego: las hipótesis emitidas, los razonamientos justificativos y el lenguaje y simbología empleados. Dentro de cada categoría de análisis se enuncian las proposiciones que utilizaron los alumnos.

  La categoría de los razonamientos justificativos contiene varias subcategorías que ayudan a perfilar los grupos de relaciones de los esquemas de razonamiento y acción. Por su parte, la categoría lenguaje y simbología también contiene dos subcategorías, atendiendo al carácter contextual del lenguaje empleado por los alumnos en sus explicaciones e interpretaciones: se considera que utilizan el lenguaje científico cuando asocian en su discurso el vocabulario de la ciencia escolar a los conceptos y acciones científicas, y se consideran propias del lenguaje cotidiano aquellas expresiones que se alejan del vocabulario aceptado, aun cuando representen ideas científicamente válidas.
- Establecidas las categorías de análisis, se elaboraron las tablas de datos para cada *item* o prueba, diseñadas a partir de las que utilizaron Domínguez, Pro, García-Rodeja e Illobre (1998-99) y Domínguez Castiñeiras (2000).

Las condiciones contextuales pueden influir en la activación de los elementos de razonamiento para la comprensión de un mismo estímulo. La información recogida en las tablas de análisis *item* a *item* revela que los razonamientos y las acciones de los alumnos se repiten con regularidad, constituyendo estructuras de razonamiento y de acción que se utilizan para elaborar interpretaciones sobre distintos fenómenos y situaciones. Así pues, el contenido de las tablas permitió identificar, a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas en cada caso, las estructuras de razonamiento y de acción que activaron los estudiantes en sus respuestas, independientemente de las actividades y pruebas planteadas. Algunas formas de razonamiento y estrategias de acción son comunes a varios estudiantes.

El formato de las tablas de análisis *item* a *item* es el que se describe a continuación (el lector puede encontrar ejemplos en los ***Volúmenes B***):

Se organizan en las filas horizontales de la primera columna las unidades de análisis, es decir, las relaciones utilizadas, que se ordenaron según las categorías a las que

se vinculan (hipótesis emitidas, razonamientos justificativos, lenguaje y simbología). Las primeras filas hacen referencia a las hipótesis planteadas por el alumnado. A continuación se disponen las relaciones que justifican la elección de las distintas hipótesis. Por último, se recogen las características del lenguaje y la simbología que utilizaron los estudiantes en sus respuestas. La penúltima fila de las tablas, que se llama ***Sin respuesta***, señala aquellos alumnos que no respondieron al *item*; en la última fila, ***No realiza la actividad***, se indica qué estudiantes no asistieron a la sesión en la que se implementó el *item*.

Por columnas, las tablas de análisis se estructuran de la siguiente manera:

La primera columna, como acabamos de comentar, contiene los rótulos con los que se designan las unidades de análisis, organizadas en sus categorías.

Cada una de las once columnas siguientes representa a un estudiante de la muestra (organizados en función de sus grupos de trabajo). En las celdas de estas columnas, se marca qué relaciones utilizó cada individuo en sus interpretaciones. A partir de esta información se determinan las estructuras de razonamiento y de acción idiosincrásicas, con respecto a las dimensiones seleccionadas (*Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje*, pág. 380).

El análisis *item* a *item* facilita valiosa información sobre los conocimientos iniciales, finales y de retención para todos los estudiantes en relación con las dimensiones seleccionadas. Partiendo de esta información, se puede evaluar el aprendizaje contrastando los datos de las dimensiones en los distintos *tempus*, sin tener que realizar contrastes *item* a *item*, que habrían exigido una repetición de las pruebas en los diferentes momentos de evaluación.

Instrumentos y estrategias de análisis y evaluación del aprendizaje

Para determinar la evolución de los conocimientos evitando en lo posible la influencia del contexto sobre el aprendizaje, se han utilizado dos métodos de análisis:

En primer lugar, se realizó un análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción (Rumelhart y Ortony, 1982; Domínguez Castiñeiras, Pro, y García-Rodeja, 2003), en el que se ponen de manifiesto las estructuras de razonamiento y las estrategias de acción que demostró cada estudiante en sus manifestaciones orales y escritas y en su trabajo manipulativo en el aula, al margen del planteamiento de las tareas propuestas en los *items* y del carácter individual o colectivo del trabajo realizado.

En segundo lugar, se evaluó el aprendizaje alcanzado en términos de las competencias que desarrollaron los estudiantes a medida que resolvieron las situaciones problemáticas planteadas en las actividades y pruebas. Las competencias idiosincrásicas se refieren a los conocimientos que pusieron en juego los alumnos para elaborar sus respuestas a los distintos *items* planteados, y se reconstruyeron sobre la base de las competencias referenciales, que representan las capacidades de utilizar el conocimiento y los procesos científicos deseables de la ciencia escolar.

A lo largo de los dos apartados que vienen a continuación, se describen los instrumentos y las estrategias que se han utilizado para la evaluación del aprendizaje alcanzado por los alumnos como consecuencia de la implementación de las propuestas ensayadas. El primero de los dos apartados se centra en la evaluación del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, y en el segundo se establece la evaluación del aprendizaje por competencias.

Evaluación del aprendizaje por esquemas de conocimiento

Aunque nos interesa saber cómo responden los alumnos a cada uno de los *items* de las actividades y las pruebas de caracterización de la muestra, nuestro objetivo es determinar qué estructuras de pensamiento activan sobre una serie de dimensiones a lo largo de ciertas situaciones de aprendizaje, independientemente de la naturaleza y la estructura de los *items* planteados en cada actividad o prueba. Este proceso, que denominamos dimensionar las pruebas, consiste en identificar los razonamientos argumentativos y las acciones que se repiten con regularidad en las respuestas de los alumnos. Con ello se puede averiguar cuáles son las ideas de cada individuo en determinados momentos, investigar su evolución e identificar las dificultades que se produjeron en la construcción de conocimiento, mediante el contraste de los esquemas de razonamiento y acción idiosincrásicos correspondientes a distintos momentos didácticos.

Se incluyó el concepto de dimensión dentro de la concepción global del aprendizaje, con la finalidad de extraer de la información de aula unas estructuras de pensamiento relativamente independientes del contexto. Mediante los esquemas de razonamiento y acción referenciales (*Síntesis de los análisis curricular y epistémico: determinación de los contenidos objeto de aprendizaje*, pág. 380), se dimensiona el conocimiento deseable: se representan y organizan las relaciones de la ciencia escolar en torno a una serie de dimensiones concretas: ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***); ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***).

Al reconstruir los esquemas de razonamiento y acción de los alumnos sobre la base de los referenciales, se puede identificar qué estructuras de pensamiento utilizan los estudiantes sobre una determinada dimensión, con una aceptable independencia respecto del contexto. En este sentido, los esquemas permiten caracterizar la evolución del conocimiento sin necesidad de utilizar las mismas pruebas en las distintas baterías de caracterización de la muestra y sin sufrir grandes pérdidas de información (Domínguez Castiñeiras, 2000; Domínguez Castiñeiras, Pro, y García-Rodeja, 2003). Mediante el análisis del aprendizaje por esquemas se puede conocer en qué grado o hasta qué punto

se acercan las estructuras de pensamiento de los estudiantes a las de la ciencia escolar, y se identifican las situaciones de aprendizaje en las que se producen modificaciones significativas de las estructuras de razonamiento y acción (evaluación de la capacidad de las propuestas ensayadas para producir cambios significativos en los conocimientos).

Ya hemos hecho explícita la relación entre aquellas características de los esquemas (Rumelhart y Ortony, 1982; Domínguez Castiñeiras, Pro, y García-Rodeja, 2003) por las que los hemos seleccionado como instrumentos para la evaluación del aprendizaje que desarrollaron los alumnos de la muestra (*La indagación sobre el proceso de aprendizaje. La teoría de los esquemas*, pág. 43). Éste es el procedimiento que se siguió en la elaboración de los esquemas de razonamiento y acción idiosincrásicos:

- Una vez que se ha identificado qué relaciones utilizaron los alumnos en sus interpretaciones a lo largo de los distintos *items*, se hacen explícitas y se representan las estructuras idiosincrásicas de razonamiento y de acción sobre la base de los cinco esquemas de razonamiento y los cuatro esquemas de acción referenciales de la ciencia escolar, según el procedimiento que se indica a continuación. Este procedimiento se repite para cada momento clave del aprendizaje (***Fp***, ***Ci***, ***Fi***, ***Cf***, ***Rt***).
- Para hacer explícitas las estructuras de razonamiento y acción que están subyacentes en el discurso de un alumno en un momento determinado de aprendizaje, se comprueba en las tablas de análisis *item* a *item* qué elementos y relaciones aparecen en el discurso (decimos entonces que se han activado), y se representan con línea continua. Los elementos y las relaciones representativas de la ciencia escolar que no aparecen en el discurso (no se han activado) se muestran de color gris, y los elementos y relaciones alternativas (que no coinciden con las referenciales) se ilustran con líneas punteadas y letra cursiva.

Los esquemas de razonamiento y acción se pueden diferenciar entre sí en el valor que se adjudica a las variables y subesquemas, y en las relaciones e inferencias que se establecen entre elementos del esquema. Las diferencias entre un esquema idiosincrásico y el referencial representativo de la ciencia escolar pueden ser más o menos significativas, y atendiendo a la mayor o menor coincidencia se puede categorizar los esquemas idiosincrásicos en diferentes niveles y subniveles que dan una idea de la proximidad entre las ideas de los alumnos y las deseables. Al comparar los esquemas correspondientes a las diferentes situaciones de aprendizaje (las intervenciones en el aula y las caracterizaciones inicial, final y de retención), se estima cómo y hasta qué punto se produjo la evolución del conocimiento de cada estudiante como consecuencia de la aplicación de las propuestas didácticas, y se determinan las diferencias en el conocimiento, antes y después de la instrucción. Esta evaluación ofrece información sobre la capacidad de las propuestas didácticas ensayadas para promover un aprendizaje significativo (estable en el tiempo), útil en la interpretación de los procesos termodinámicos.

Evaluación del aprendizaje por competencias

También se evaluó el aprendizaje en términos de las competencias que desarrollaron los estudiantes: a medida que resolvían las cuestiones planteadas en las actividades y las pruebas de caracterización, movilizaron sus conocimientos en diferentes situaciones y contextos. Así pues, podemos decir que demostraron sus competencias idiosincrásicas, que representan sus capacidades de utilizar los conceptos, modelos y procesos científicos.

Desde el punto de vista analítico, en esta investigación se reconstruyeron y evaluaron las competencias de los alumnos de la muestra con respecto a las competencias referenciales de la ciencia escolar, las cuales fueron diseñadas por los investigadores mediante la determinación del conjunto de los conocimientos (conceptuales y procedimentales), las habilidades, la pericia y las aptitudes necesarias para analizar y resolver las cuestiones problemáticas planteadas. Al comparar las competencias idiosincrásicas correspondientes a las diferentes situaciones de aprendizaje (esto es, a las intervenciones en el aula y a las caracterizaciones inicial, final y de retención), se estima cómo y hasta qué punto se produjo la evolución del conocimiento de cada individuo como consecuencia de la aplicación de las propuestas didácticas, y se determinan las diferencias en el conocimiento, antes y después de la instrucción. En este sentido, la evaluación por competencias también ofrece información sobre la capacidad de las propuestas didácticas ensayadas para promover un aprendizaje significativo (estable en el tiempo), porque permite estimar en qué grado o hasta qué punto evolucionan las competencias científicas de los alumnos (evaluación del aprendizaje), e identificar las situaciones, los contextos y las tareas que promueven cambios significativos en la capacidad de poner en juego el conocimiento científico (evaluación de las propuestas ensayadas en función de su efectividad para generar un aprendizaje útil y significativo de la ciencia escolar).

El diseño del análisis del aprendizaje por competencias no estaba planificado desde el principio de la investigación, sino que surgió, después de que se publicaran los resultados de PISA (2009), como consecuencia de una reflexión personal de los investigadores sobre la posibilidad de aplicar el concepto de competencia a los datos de esta Tesis, a la vista de la facilidad de monitorización que proporcionada la pequeña muestra objeto de estudio:

Los datos del análisis *item* a *item* proporcionan información contextualizada sobre la utilización de las principales relaciones conceptuales y procedimentales que utilizaron los alumnos en sus respuestas. Estos datos se sometieron a un análisis cualitativo que, en un principio, se denominó *análisis conceptual/procedimental del conocimiento* (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2010), porque en él el concepto de competencia se encontraba en estado embrionario. En aquel momento, la investigadora se hallaba en un momento de su vida personal en el que necesitaba una cantidad de tiempo considerable para revisar la

literatura del área sobre competencias, así que en un principio solamente se pretendía explorar qué utilidad concedían los alumnos a los principales constructos termodinámicos para resolver las situaciones problemáticas planteadas, con qué coherencia utilizaban los nuevos conocimientos y qué valor y alcance descriptivo e interpretativo otorgaban a los principales conceptos y procedimientos científicos.

Por contextualizar el conocimiento utilizado, estimar su evolución y valorar la capacidad que demostraban los alumnos en la utilización de sus conocimientos, la idea que subyace al análisis *conceptual/procedimental* es la de competencia científica (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2010). Para llegar a diseñar un auténtico análisis del aprendizaje por competencias, se tuvieron en cuenta las advertencias de la literatura en la didáctica del área sobre la dificultad que supone evaluar de manera integral los tipos de contenido conceptual, procedimental y actitudinal, aplicados interrelacionadamente a la resolución eficaz de una situación en un contexto dado (Arnau, 2009):

La competencia es multifuncional y multidimensional por naturaleza, traspasa dominios y ámbitos de conocimiento y se demuestra mediante la utilización de órdenes superiores de complejidad mental (Rychen y Salganik, 2003). Por ello, se hace difícil delimitar qué componentes la articulan, y su evaluación es asimsmo muy compleja. Evaluar la competencia científica significa analizar cómo aplica un individuo sus conocimientos científicos a contextos y situaciones relevantes para su vida, en relación con su grado de comprensión de la Ciencia y sobre la Ciencia, y con su capacidad para identificar los aspectos científicos y tecnológicos de la cuestión planteada, para acceder a la información y evaluarla, y para interpretar las pruebas que hagan al caso (OCDE, 2006a). La complejidad de evaluación de las competencias (Arnau, 2009) tiene múltiples implicaciones para el diseño experimental de una investigación:

En primer lugar, no se trata de estimar el grado de consecución de unos objetivos de aprendizaje, entendidos como la adquisición de potencialidades para hacer una tarea. La competencia podría definirse, de cara a la evaluación, como la plasmación de dicha potencialidad en actos, o la capacidad (concepto estático) llevada a contextos determinados concretos ligados a la acción, y por tanto convertida en el concepto dinámico de competencia (Moreno Alcalde, 2008). Los conceptos de capacidad y competencia van estrechamente unidos: las capacidades nos hacen competentes, y las competencias nos hacen capaces (Arnau, 2009); algunos autores reflexionan sobre las implicaciones de la relación entre capacidad y competencia, pero, en todo caso, existe una clara necesidad de aprender conocimiento científico de manera significativa para ser competente (Torres, 2008). Una persona que no posea una cultura básica en Ciencias no puede alcanzar, en la resolución de una tarea de base científica, grados de eficacia comparables a los quien domina los conceptos y procedimientos científicos básicos y es capaz de transferirlos a distintas situaciones y contextos. Con la finalidad de medir la utilidad que tienen los constructos científicos de Termoquímica y Termodinámica Química en la resolución de cuestiones problemáticas, independientemente de la tarea

planteada y del contexto de su realización, se ha diseñado el indicador de competencia llamado ***potencialidad interpretativa del conocimento*** (***IC₁***), que abarca cuatro componentes (factores) mediante los que se representa el *status* ontológico y epistemológico de los conocimientos conceptuales y procedimentales.

Como ya hemos indicado, la aplicación y transferencia (activación) del conocimiento científico depende del contexto, así que otra dificultad en el diseño de un análisis del aprendizaje por competencias, es que éste debe evaluar la capacidad para aplicar los conocimientos, destrezas, etc., en contextos reales, con las complicaciones que ello introduce. Hay que integrar las tareas en contextos de la vida real, y seleccionar contextos y situaciones que sean relevantes para el alumnado, y al mismo tiempo adecuados al nivel general de conocimiento: ni demasiado sencillos como para que la tarea acabe consistiendo en un ejercicio, ni tan abstrusos o inaccesibles que los estudiantes desaprovechen esfuerzos en descrifrar claves circunstanciales, eclipsando la aplicación de los procesos cognitivos a la resolución de la tarea. Para evaluar los aspectos contextuales de la movilización de las competencias, en el análisis del aprendizaje se ha introducido el indicador ***potencialidad de activación del conocimento*** (***IC₂***), desglosado en cuatro componentes (factores) que representan la perspectiva de la situación problemática.

En tercer lugar, la competencia no puede medirse en términos absolutos, porque las distintas actuaciones eficaces que resuelven de manera aceptable una situación pueden moverse en un *continuum* entre un valor mínimo que representa el *fracaso* y un valor máximo que simboliza el máximo grado de *acierto*, entendiendo el *fracaso* y el *acierto*, respectivamente, como el menor y el mayor éxito en la aplicación de los conocimientos; éstos son los extremos del intervalo de los valores que puede tomar el grado de eficacia en la resolución de la tarea. En consecuencia, la evaluación de la competencia debe incluir indicadores de logro que midan el grado de eficacia con el que se resuelven las situaciones planteadas, teniendo en cuenta las componentes de conocimiento conceptual, procedimental y axiológico. El método de análisis por competencias ha de permitir en lo posible la determinación de los problemas de aprendizaje: ¿en qué extensión se deben éstos a falta de conocimiento de alguno de las componentes, a falta de interrelación entre ellos o a obstáculos en la transferencia de los aprendizajes a nuevas situaciones? No resulta sencillo, además, fijar los extremos del intervalo dentro del cual se mueve la eficacia de resolución de las cuestiones científicas, porque el proceso de adquisición de las competencias no se acaba en la vida (Pro, 2007), y de una misma competencia se pueden definir distintos niveles de complejidad. Para afrontar esta problemática, nuestro método del análisis del aprendizaje por competencias mide las competencias del alumnado en comparación con dos niveles de competencia referenciales, que representan la eficacia mínima requerida para resolver cada una de las cuestiones propuestas, y una eficacia considerada intermedia entre la mínima y la máxima.

Por último, según PISA 2006 (OCDE, 2006a), la adquisición de una competencia no debe limitarse a un contexto dado, sino que debe demostrarse o aplicarse en otros

contextos. Así pues, el método de análisis del aprendizaje por competencias debe evaluar la capacidad de los alumnos para aplicar sus conocimientos de manera flexible y estratégica, transfiriendo sus ideas a nuevas situaciones no conocidas e inmersas en nuevos contextos; y, aun en casos complejos, el método de análisis debe permitir la determinación del grado de aprendizaje en todas las componentes que integran la competencia. Aunque las actividades de las unidades didácticas ensayadas y las pruebas de caracterización de la muestra no fueron diseñadas para realizar una evaluación del aprendizaje por competencias, el marco teórico de esta investigación establece que el aprendizaje significativo supone el establecimiento de esquemas de razonamiento y de acción que permiten aplicar de manera efectiva el conocimiento construido, así que se pone de manifiesto en la capacidad del individuo para transferir la información procesada a nuevas situaciones y contextos en los que no ha sido probada. En consecuencia, las actividades y pruebas ensayadas en esta Tesis contemplan la necesidad de que los alumnos transfieran sus ideas para dar respuesta a cuestiones de base científica que se mueven entre distintos fenómenos, situaciones y contextos, que se han elegido de manera que sean lo más relevantes posible para el alumnado e interesantes desde el punto de vista de la ciencia escolar.

En resumen, a la hora de diseñar un método de evaluación del aprendizaje por competencias, se debe analizar la funcionalidad de los conocimientos, capacidades, destrezas y actitudes necesarias para resolver problemas, y el método de evaluación debe ser tal que indague en las múltiples interrelaciones establecidas. Desde la concepción holística de competencia, un individuo es competente cuando domina todas las capacidades y las aplica de manera global para resolver problemas de la vida real; así que para evaluar la competencia se necesitan pruebas que integren, en lo posible, todas las competencias específicas de las distintas áreas y, dentro de cada área, las capacidades asociadas, incluyendo la componente actitudinal, de la que se tienden a olvidar las pruebas que se han realizado hasta la fecha (Arnau, 2009).

En este sentido, las preguntas que realiza PISA para la evaluación de las competencias, parten de una una situación acerca de la cual miden las capacidades de identificación y selección de la información, y de análisis según el modelo científico. Se trata de pruebas de lápiz y papel consistentes en preguntas largas que requieren un buen nivel de competencia lectora y presentan diversidad de cuestiones sobre pocos supuestos planteados. Las preguntas pueden ser de respuesta múltiple, cerradas o abiertas. Algunas se responden de manera adecuada con una palabra o cifra, mientras que otras requieren la redacción de un texto breve (Márquez y Sardà (2009)). Sin embargo, los criterios de evaluación no parecen registrar si las causas de un resultado insatisfactorio están en una baja competencia lectora y/o matemática, o en actitudes negativas hacia la prueba o su contenido (aunque no se plantean reflexiones o dilemas éticos ligados a la actividad científica), o en la falta de conocimientos científicos, o en problemas para transferir éstos a una situación o contexto determinados. Estas carencias de evaluación se deben, en buena

parte, a la propia naturaleza y planteamiento del proyecto PISA (Oñorbe, 2008), que realiza una evaluación a nivel internacional sobre una muestra muy amplia cuyo estudio completo requeriría una laboriosa y complicada tarea:

Se requiere identificar si los diferentes tipos de saberes que se ponen en juego al mismo tiempo, se movilizan de manera coherente y a un determinado nivel de calidad en las distintas capacidades. Uno de los métodos más aplicados para valorar un nivel de competencia es la planificación de las "rúbricas", matrices que contienen los criterios de evaluación de la competencia, frente a los indicadores seleccionados para establecer diferentes niveles de logro en la realización de un tipo de tarea (Sanmartí, 2011). Por ejemplo, para cada competencia o capacidad, el marco teórico de PISA 2006 (OCDE, 2006a) establece 6 niveles de progresión en una escala de alfabetización científica, cuyo mínimo aceptable es el nivel 2, en el cual los alumnos son capaces de indicar las características básicas de una investigación científica, identificar conceptos básicos de la Ciencia e informaciones diversas relacionadas con una situación, y presentar y utilizar resultados de una investigación para su uso personal.

Mientras que el marco teórico de PISA 2006 diagnostica los conocimientos de una muestra muy amplia en un momento concreto, esta investigación de Tesis tiene como finalidad determinar cómo evoluciona a lo largo de un lapso de tiempo de unos tres meses, el conocimiento de once alumnos de un grupo de 2º de Bachillerato que trabajan en la misma aula y con ayuda del mismo profesor.

Para evaluar de una manera continua el proceso de aprendizaje, desde la literatura del área, Arnau (2009) se propone una delimitación de las competencias básicas objeto de las unidades didácticas, para desglosarlas en competencias más específicas que se pueden traducir en los tipos de contenido conceptual, procedimental y actitudinal. Se diseñan actividades de evaluación cuya resolución exija la aplicación de los conocimientos conceptuales y procedimentales, de manera que se pueda inferir el aprendizaje de los distintos componentes y de la capacidad de aplicarlos de manera interrelacionada; en cuanto a lo actitudinal, se proponen metodologías que permitan realizar un seguimiento de aquellos aspectos que no pueden evaluarse con pruebas escritas.

Teniendo en cuenta la literatura del área publicada hasta 2009, y las directrices del nuevo *curriculum* para el Bachillerato (MEC, 2006a; 2007), diseñamos el presente análisis del aprendizaje por competencias, que se ha utilizado en esta investigación de Tesis para determinar la evolución que experimentaron los conocimientos de los alumnos de la muestra a medida que interaccionaban con las dos propuestas didácticas ensayadas.

Si aceptamos que el aprendizaje supone la articulación de las capacidades que se adquieren al dominar determinados conocimientos conceptuales, adquirir y consolidar una serie de destrezas y estrategias, y adoptar ciertas actitudes, podemos considerar que un auténtico aprendizaje implica el desarrollo de competencias que los individuos movilizan cuando aplican el conocimiento construido (p.ej., Rychen y Salganik, 2003;

Cañas, Martín-Díaz, y Nieda, 2007; VV.AA., 2009b) en diferentes situaciones y contextos para dar respuesta a cuestiones problemáticas relacionadas con las Ciencias.

Para adaptar la evaluación de las competencias a las finalidades de nuestra investigación, reconstruimos el concepto de competencia científica partiendo de las líneas maestras del marco teórico de PISA 2006 (OCDE, 2006a), que pone de manifiesto la idiosincrasia, relevancia y funcionalidad de las Ciencias en el conocimiento humano sin restringir ni dar prioridad a la función de la escolarización como etapa orientada a la preparación para el mundo laboral. Desde el constructivismo social, consideramos que la competencia científica debe aportar una perspectiva amplia e integradora de las capacidades relacionadas con los conocimientos conceptuales, las destrezas cognitivas y experimentales, y los aspectos afectivos que incluyen las actitudes, valores, normas y motivaciones relacionadas con la actividad científica; de esta manera, la competencia científica expresa la necesidad de que los estudiantes desarrollen sus capacidades y lleguen a movilizar y transferir sus conocimientos para dar respuesta a los diversos hechos, situaciones y problemas que se presenten en sus vidas.

Sobre la base de PISA 2006, reestructuramos el concepto de competencia científica, teniendo en cuenta que nuestro objetivo es determinar el aprendizaje de una muestra de alumnos y relacionarlo con aspectos curriculares (las propuestas didácticas sobre Termoquímica y Termodinámica Química). Tal como indica la literatura del área de Didáctica de las Ciencias (*Las competencias en esta investigación de Tesis. Definición de la competencia científica*, pág. 101), desarticulamos las competencias (capacidades) científicas de PISA en otras cada vez más simples según se muestra en los anexos del ***Volumen B₂***, donde se explica de manera gráfica cómo se han calculado los valores numéricos de cada competencia, en relación con los indicadores (***IC***s) y factores de competencia (***fc***s).

Partiendo de este mismo marco teórico, hemos evaluado otras competencias distintas de la científica: la ***competencia matemática***, la ***competencia en el tratamiento de la información y competencia digital***, la ***competencia social y ciudadana***, la ***competencia en comunicación lingüística*** y la ***competencia en aprender a aprender***; para cada una se ha identificado una serie de competencias más concretas (capacidades). No se ha contemplado la ***competencia en el desarrollo de la autonomía e iniciativa personal***, cuyas competencias se pueden considerar incluidas en ***aprender a aprender*** y en las unidades de análisis actitudinales de la ***competencia científica***; tampoco se ha estimado la ***competencia cultural y artística***, por no disponer de datos de aula suficientes sobre ella.

En Termodinámica, los alumnos demuestran todas estas competencias cuando activan determinadas relaciones conceptuales adecuadas y realizan ciertas acciones científicas, de acuerdo con aspectos axiológicos acordes con la ciencia escolar. En este sentido, las competencias más simples que acabamos de declarar se pueden representar mediante unidades mínimas de competencia o ***elementos de la competencia*** (***EC***s) que representan relaciones conceptuales, acciones y aspectos axiológicos acordes con la ciencia

escolar que son tan elementales como para poder asociarles valores concretos de los factores (***fc***s) que conforman los indicadores de la competencia; a partir de sumas de ***IC***s se ha obtenido el nivel de las distintas competencias.

Los ***elementos de la competencia*** son las unidades de análisis seleccionadas en esta investigación, porque a partir de ellos se reconstruye el nivel de competencia de los estudiantes en los distintos momentos didácticos. En total, el número de ***EC***s identificados en esta investigación supera los 1000, así que si se les aplicara el formato tipográfico de las tablas *item* a *item*, una tabla de ***elementos de la competencia*** ocuparía varias páginas. Para simplificar el análisis, de entre los ***EC***s se han seleccionado aquéllos que son más concretos, y se los ha agrupado en ***EC***s más amplios, a los que hemos llamado ***elementos principales de la competencia*** (***EPC***s). Los valores de los ***IC***s correspondientes a los ***EPC***s se han calculado mediante el sumatorio de los ***IC***s de los ***EC***s a los cuales agrupan. En los anexos del ***Volumen B***$_2$ aparecen recogidos los ***EPC***s.

El hecho de que un individuo movilice un elemento cualquiera de la competencia para resolver un problema de base científica, responde a la utilidad que concede al conocimiento conceptual y procedimental involucrado, según las disposiciones axiológicas que haya tomado con relación a la cuestión planteada. Dicha utilidad depende, en primer lugar, de la naturaleza del propio conocimiento científico, que lo hace conveniente y fructífero en la interpretación de la realidad; y, en segundo lugar, depende de la naturaleza de la cuestión problemática, la cual determina qué conocimientos concretos del bagaje de la Ciencia son útiles para resolver una cuestión, de acuerdo con el tipo de tarea a realizar y con la cantidad y calidad de información que el individuo es capaz de extraer de diversas fuentes, como el planteamiento de la cuestión, sus experiencias vitales y las estrategias y métodos que utilice para generar más conocimiento en el contexto de la tarea (Jiménez Aleixandre, 2010).

Así pues, en un análisis del aprendizaje por competencias se hace extremadamente difícil obviar el contexto. No obstante, si se descompone la competencia científica en unidades de análisis mínimas que permitan atribuirles indicadores trazables, se pueden analizar por separado las contribuciones ontológico-epistemológica y contextual del conocimiento. En el método de análisis que hemos diseñado, cada una de estas dos contribuciones se evalúa mediante un indicador de competencia (***IC***), de manera que el ***IC*** correspondiente a las características ontológicas y epistemológicas del conocimiento científico permite obviar la influencia del contexto en el que se presenten las actividades o pruebas planteadas, y el ***IC*** asociado a los aspectos contextuales ayuda a indagar en los aspectos relacionados con las situaciones y ámbitos en los que se demanda la movilización del conocimiento científico. Esta posibilidad de estudiar por separado la influencia del contexto es especialmente interesante en esta investigación, en la que conviene analizar hasta qué punto influyen los factores contextuales relacionados con las tareas propuestas y sus enfoques, en las competencias que demuestran los alumnos a lo largo de las diferentes situaciones de aprendizaje.

Las categorías de análisis que hemos diseñado no se establecieron *a priori*, sino a partir de las conexiones entre las recientes propuestas de la literatura del área sobre las competencias (*Las competencias en esta investigación de Tesis. Definición de la competencia científica*, pág. 101) y el marco teórico de la investigación sobre los aspectos que influencian las ideas de los alumnos (*Ideas alternativas de los alumnos y dificultades de aprendizaje de la Termodinámica*, pág. 123); además, se han tenido en cuenta las observaciones realizadas sobre los resultados de evaluación del aprendizaje mediante esquemas de razonamiento y acción.

Estas reflexiones sobre los aspectos ontológico-epistemológico y contextual del conocimiento científico, de los que depende su movilización, nos llevaron a definir dos ***indicadores de la competencia*** (***IC***s), de manera que cada uno evalúa uno de los citados aspectos en función de cuatro factores (***factores de la competencia***, ***fc***s) que sirven para definir el valor numérico que adopta el ***IC*** correspondiente a cada unidad de análisis o ***elemento de la competencia***. La adjudicación de valores numéricos obecede a la conveniencia de realizar una evaluación semicuantitativa de los distintos niveles de la competencia científica alcanzada por los alumnos de la muestra, basándose en la idea de que el desarrollo de los aspectos conceptuales, procedimentales y actitudinales de la ciencia escolar está caracterizado por una movilización del conocimiento científico creciente en cuanto a la cantidad y calidad de los razonamientos y las acciones que se realizan a medida que se dominan más relaciones conceptuales y procesos propios de la actividad científica. El aprendizaje supone un progresivo avance en las competencias de los estudiantes, en función de la potencialidad interpretativa y la potencialidad de activación que reconozcan al conocimiento científico.

En este sentido, podemos afirmar que nuestro análisis del aprendizaje por competencias enfoca la movilización del conocimiento científico desde dos puntos de vista, cada uno de ellos evaluado por un indicador de la competencia (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2012):

El primer indicador, IC_1, es la ***potencialidad interpretativa del conocimiento***, mediante la cual se estima la utilidad que tienen los constructos científicos, por su naturaleza, para resolver cuestiones problemáticas, independientemente de la tarea planteada y del contexto de su realización. La potencialidad interpretativa se refiere a las características ontológicas y epistemológicas de los conocimientos científicos involucrados, las cuales se desglosan en cuatro ***factores de la competencia fc***s:

Dominio de representación del conocimiento (IC_1fc_1): analiza la utilización de las representaciones macroscópicas, microscópicas y simbólicas, de acuerdo con los dominios de representación del conocimiento descritos por Johnstone (1982). Los valores que se han asignado a este factor permiten distinguir entre unidades de análisis del dominio macroscópico, IC_1fc_1[M] = 1, microscópico, IC_1fc_1[m] = 2 y simbólico, IC_1fc_1[S] = 0. La asignación del valor cero a las unidades de análisis que se limitan al dominio simbólico

obedece al interés por discriminar numéricamente las situaciones en las que los alumnos trabajan exclusivamente con fórmulas, ecuaciones y símbolos sin manifestar que entienden y aplican los conocimientos macroscópicos o microscópicos que representan; la literatura en Didáctica de las Ciencias insiste en que muchos alumnos que manejan adecuadamente las herramientas del dominio simbólico, incluyendo los algoritmos matemáticos, no despliegan la misma efectividad resolviendo cuestiones problemáticas, en las que se les exige que demuestren su nivel de conocimiento conceptual y procedimental (*El tratamiento matemático de las magnitudes termodinámicas*, pág. 133).

La potencialidad interpretativa de los razonamientos es más elevada cuanto mayor es la integración entre los dominios, si las interpretaciones se mueven entre distintos niveles de representación, utilizando los conocimientos y el lenguaje propios de cada dominio y gran cantidad de información implícita, sobre todo de los dominios macroscópico y microscópico. Para expresar esta idea se declara el valor $\boldsymbol{IC_1fc_1}$[Mm] = 3, que se aplica a las unidades de análisis caracterizadas por integrar conocimientos procedentes de los dominios macro y microscópico.

Modelo ($\boldsymbol{IC_1fc_2}$): este factor se aplica a aquellas unidades de análisis del dominio microscópico que se adscriben a los modelos que interesa construir mediante la intervención en el aula, que son los de partículas ($\boldsymbol{IC_1fc_2}$[P] = 1), enlace ($\boldsymbol{IC_1fc_2}$[E] = 2) y reacción química ($\boldsymbol{IC_1fc_2}$[R] = 3). Cuanto más completos sean los modelos químicos construidos para elaborar razonamientos, más potencialidad interpretativa se alcanza.

Categoría ontológica ($\boldsymbol{IC_1fc_3}$): de acuerdo con Chi, Slotta y De Leeuw (1994), las entidades del mundo se pueden clasificar en tres categorías ontológicas que definen sus características conceptuales básicas: objetos, estados mentales, y procesos. Pozo y Gómez Crespo (1998) distinguen entre los principios ontológicos que aquí denominamos objetos ($\boldsymbol{IC_1fc_3}$[O] = 1), estados ($\boldsymbol{IC_1fc_3}$[E] = 2) y procesos ($\boldsymbol{IC_1fc_3}$[P] = 3). A su vez, dentro de cada categoría existen diversas clases de entidades. Por ejemplo, tanto los eventos como las interacciones son procesos, pero los primeros tienen un principio y un final, mientras que las segundas describen aspectos interaccionantes de los sistemas que producen un balance o permiten alcanzar un estado concreto, como el de equilibrio. Esta clasificación se puede relacionar con la caracterización ontológica de los procesos como directos o emergentes (Chi, 2005). Las reacciones químicas, por ejemplo, son procesos emergentes de tipo interactivo, no procesos lineales directos, como muchos alumnos suponen; estas ideas alternativas sobre la naturaleza ontológica de los procesos entroncan con la tendencia a establecer razonamientos causales lineales (Rozier y Viennot, 1991).

En el método de evaluación del aprendizaje por competencias que hemos diseñado, no se establecen clases de entidades dentro de cada categoría ontológica, para no complicar innecesariamente el análisis: se pretende averiguar si los alumnos de la muestra asignan atributos ontológicos adecuados a los constructos termodinámicos, y explorar las asignaciones inadecuadas.

El factor de competencia IC_1fc_3 es un estimador de la potencialidad interpretativa del conocimiento, y permite identificar los perfiles descriptivos y explicativos del alumnado, analizando en función del *status* ontológico qué constructos tienen para ellos una mayor relevancia. Aquellos estudiantes que utilicen adecuadamente ideas relacionadas con las tres categorías ontológicas, construirán razonamientos interpretativos de mayor profundidad y detalle.

Operación epistémica (IC_1fc_4): tomando como fundamento las operaciones epistémicas utilizadas por Díaz y Jiménez (1999), los procesos cognitivos básicos se organizan en varias categorías de análisis, algunas de las cuales figuran entre las de TIMSS (Mullis *et al.*, 2007). Las operaciones epistémicas se definen como estrategias cognitivas que los alumnos despliegan en el discurso y que se refieren específicamente a la producción y validación del conocimiento científico escolar: la identificación de problemas, el manejo de datos anómalos, el planteamiento de hipótesis, el análisis de datos, etc. En la literatura del área se han publicado investigaciones que utilizan criterios epistémicos, por ejemplo, para el análisis de la argumentación; así, en el estudio de Kelly y Takao (2002), las proposiciones de los estudiantes se clasifican en niveles epistémicos de complejidad creciente (desde la referencia directa a datos hasta la elaboración de proposiciones generales que incluyen referencias a modelos y teorías científicas) y se explora cómo las relaciones entre proposiciones de distintos niveles establecen argumentos más persuasivos.

En el método de análisis del aprendizaje por competencias que aquí se presenta, las operaciones mentales que intervienen en la elaboración de razonamientos complejos y de planes, se descomponen en procesos mentales lo más sencillos posible, a los que hemos llamado "operaciones epistémicas". No utilizamos la denominación de "procesos científicos" o "procesos mentales" para no confundir al lector: los "procesos científicos" reconocidos en PISA son asimilar, interpretar y actuar partiendo de pruebas (OCDE, 2006a), y en la literatura en Didáctica de las Ciencias tiende a llamarse "procesos científicos" a los tres elementos de la competencia de la categoría de *interpretación y uso de pruebas científicas.*

Las operaciones epistémicas que se analizan en esta investigación son las definiciones (IC_1fc_4[Def]), las caracterizaciones (IC_1fc_4[Crc]) y las interpretaciones (IC_1fc_4[Int]). Dentro de cada categoría se distingue entre operaciones epistémicas más sencillas y más complejas, y se les asignan valores que reflejan esta complejidad. Así, las definiciones pueden ser básicas (IC_1fc_4[Def(B)] = 1) o completas (IC_1fc_4[Def(C)] = 2), dependiendo de si los alumnos se limitan a declarar la naturaleza del concepto o si además reconocen sus limitaciones y condicionantes. Se distinguen dos tipos de caracterizaciones, descripciones (IC_1fc_4[Crc(D)] = 2), y clasificaciones (IC_1fc_4[Crc(C)] = 3). Dentro de las interpretaciones se establecen tres clases: explicaciones (IC_1fc_4[Int(E)] = 3), distintas de las justificaciones (IC_1fc_4[Int(J)] = 4), y las predicciones (IC_1fc_4[Int(P)] = 5).

Según Jiménez y Díaz (2003), "una justificación es una explicación basada en pruebas". Consideramos que la diferencia entre una explicación y una justificación está en que, aunque ambas requieren el uso de la inducción y la deducción para establecer afirmaciones sobre el conocimiento basadas en experiencias previas o en modelos, teorías o enunciados, las justificaciones son más profundas que las explicaciones, porque generan razonamientos más complejos o abstractos para indagar en las causas últimas de los hechos o fenómenos que se interpretan. Por lo tanto, en el análisis del aprendizaje por competencias que hemos diseñado y aplicado, atribuimos una mayor potencialidad interpretativa a las justificaciones que a las explicaciones. En rigor, todos los tipos de operaciones epistémicas que establecemos requieren algún tipo de explicación o de justificación; pero si ésta no exige un elevado esfuerzo cognitivo, consideramos que desde el punto de vista analítico no procede caracterizarla como una operación interpretativa.

Desde el punto de vista del análisis del aprendizaje, es interesante indagar en la articulación de las operaciones epistémicas que predominan en las ideas del alumnado, porque se ha constatado que los estudiantes experimentan dificultades para superar lo meramente fenomenológico y descriptivo y articular auténticas teorías y modelos científicos en sus interpretaciones. A su vez, los obstáculos de aprendizaje relacionados con la falta de comprensión e integración de las teorías y los modelos científicos alimentan los problemas para realizar interpretaciones de alto nivel, e incluso para distinguir entre la descripción y la explicación de un fenómeno (Espíndola y Cappannini, 2010).

El indicador $\boldsymbol{IC_1}$, potencialidad interpretativa del conocimiento científico, ayuda a perfilar el *status* ontológico y epistemológico de las ideas que utilizan los alumnos para resolver cuestiones relevantes, y permite estimar la coherencia y la consistencia de dichas ideas. La coherencia se define como la ausencia de contradicciones internas Pintó *et al.* (1996). Una concepción es consistente cuando se mantiene equivalente en contextos distintos (Jiménez, Solano y Marín, 1994).

El cálculo del $\boldsymbol{IC_1}$ correspondiente a las distintas unidades de análisis (***EC***s), se ha realizado mediante la suma de los valores de los factores de competencia $\boldsymbol{IC_1fc_1}$, $\boldsymbol{IC_1fc_2}$, $\boldsymbol{IC_1fc_3}$ y $\boldsymbol{IC_1fc_4}$ atribuidos al ***EC***. Dado que $\boldsymbol{IC_1}$ se refiere a la naturaleza del conocimiento científico, su valor depende de las ideas de la ciencia escolar que representa cada ***EC***, y es independiente de la actividad o prueba planteada.

La competencia científica, como las demás, se desarrolla cuando se realizan tareas que exigen la aplicación de los conocimientos a una variedad de contextos (Jiménez, 2010), y desde el punto de vista analítico conviene evaluar los aspectos contextuales de la movilización de las ideas de la ciencia escolar. Para ello, en nuestro análisis del aprendizaje se ha introducido el segundo indicador de la competencia, $\boldsymbol{IC_2}$, que es la ***potencialidad de activación del conocimiento***. Con él se indaga en la influencia que ejercen las tareas, las situaciones y los contextos en la utilidad que conceden los individuos a las ideas de la ciencia escolar. $\boldsymbol{IC_2}$ se desglosa en cuatro factores ***fc***s mediante

los que se representa la perspectiva de la situación problemática, teniendo en cuenta el tipo de tarea a la que se enfrentan los alumnos, el grado de consolidación de los conocimientos que ya poseen, la cantidad, calidad y disponibilidad de la información que pueden utilizar para resolver las cuestiones, y la complejidad y profundidad de la respuesta que se les pide.

Importancia en la resolución de la cuestión planteada (***IC$_2$fc$_1$***): este factor analiza la importancia que tienen las ideas de la ciencia escolar en la resolución de la tarea. Si los alumnos identifican qué conocimientos son más importantes y los utilizan de manera coherente en la elaboración de razonamientos y la realización de acciones, podemos asociar la tarea con una buena potencialidad de activación de dichos conocimientos, tanto más si éstos son imprescindibles para resolver la cuestión (***IC$_2$fc$_1$***[I] = 3), algo menos si se solamente son relevantes (***IC$_2$fc$_1$***[R] = 2), y menos si son complementarios, secundarios (***IC$_2$fc$_1$***[C] = 1).

Novedad (***IC$_2$fc$_2$***): permite categorizar las ideas de la ciencia escolar atendiendo a su significatividad para el alumnado. Mediante este factor se analiza cuánto tardan los estudiantes en incorporar los nuevos conocimientos a los ya conocidos. Para ello, se establece una puntuación distinta a las ideas recién presentadas (***IC$_2$fc$_2$***[N] = 3), a aquéllas con las que se ha trabajado en una o dos actividades (***IC$_2$fc$_2$***[P] = 2) y a las que se consideran ya conocidas (***IC$_2$fc$_2$***[C] = 1). Una tarea tiene mayor potencialidad de activación cuanto más facilita la movilización de conocimiento nuevo para dar respuesta a cuestiones de base científica.

Explicitación en el planteamiento de la tarea (***IC$_2$fc$_3$***): este factor indica si la unidad de análisis aparece (***IC$_2$fc$_3$***[S] = 0) o no (***IC$_2$fc$_3$***[N] = 1) en el enunciado de la tarea, con la finalidad de comprobar hasta qué punto los alumnos elaboran razonamientos argumentativos cuyas ideas clave no se les facilitan en los materiales de trabajo. Se atribuye mayor potencialidad de activación a aquellas actividades en cuya resolución los estudiantes utilizan más afirmaciones que no son evidentes en el planteamiento de la cuestión. Recuérdese que parte de las dificultades encontradas en prácticas científicas como la argumentación y el uso de pruebas tienen que ver con problemas en la comprensión de textos, con un conocimiento insuficiente de la naturaleza del trabajo científico, y con dificultades para transferir a un contexto o una tarea lo aprendido en otro (Jiménez Aleixandre, 2010, capítulo 2).

Fuente de información (***IC$_2$fc$_4$***): hace referencia a la calidad y variedad de las fuentes de las que los alumnos deben extraer información en la que fundamentar sus razonamientos. Una tarea tiene mayor potencialidad de activación cuando su resolución requiere una búsqueda de información científica en fuentes fiables. Los valores del factor ***IC$_2$fc$_4$*** estiman el grado de esfuerzo cognitivo que se deben realizar para localizar y procesar la información. Así, se ordenan de menor a mayor valor las ideas que aporta el profesor en los debates de aula (***IC$_2$fc$_4$***[D] = 1), las que se recogen en las tablas de datos

termodinámicos (***IC*$_2$*fc*$_4$**[T] = 2), las que se rescatan de actividades pasadas (***IC*$_2$*fc*$_4$**[A] = 3), las que se consultan en el libro de texto (***IC*$_2$*fc*$_4$**[L] = 4), las que se buscan en Internet (***IC*$_2$*fc*$_4$**[I] = 5), y, con la mayor puntuación de ***IC*$_2$*fc*$_4$** están las ideas de elaboración propia, que se desarrollan mediante el razonamiento y la argumentación sin surgir de la consulta de fuentes de información escritas o de la interacción con el profesor (***IC*$_2$*fc*$_4$**[E] = 6).

La potencialidad de activación del conocimiento científico en función de la tarea y de su contexto, permite estimar la capacidad de una determinada actividad o prueba para promover la utilización de las ideas científicas por parte del alumnado.

El cálculo del ***IC*$_2$** correspondiente a las distintas unidades de análisis (***EC***s), se ha realizado mediante la suma de los valores de los factores de competencia ***IC*$_2$*fc*$_1$**, ***IC*$_2$*fc*$_2$**, ***IC*$_2$*fc*$_3$** y ***IC*$_2$*fc*$_4$** atribuidos al ***EC***. Dado que ***IC*$_2$** se refiere a la naturaleza de la tarea propuesta, su valor depende de la naturaleza y características de la actividad o prueba concreta que se resuelva en cada caso.

Además, se diseñó un noveno factor de la competencia científica (***factor de resolución de cuestiones científicas***, ***fc***$_{\leftrightarrow}$) que no se encuadra en ninguno de los dos ***IC***s, porque se evalúa de dos maneras: por un lado, independientemente de la tarea planteada, y, por otro, en función de ella.

Según el marco teórico de PISA 2006 (OCDE, 2006a), los conocimientos científicos constituyen los vínculos que facilitan la comprensión de fenómenos relacionados, porque incluyen no solamente los conceptos y teorías de la Ciencia, sino también los rasgos esenciales de las investigaciones científicas, los tipos de respuesta que se pueden obtener mediante la Ciencia, y la forma en que los científicos interpretan la realidad. Estos aspectos se han reflejado en el análisis del aprendizaje por competencias mediante el factor ***fc***$_{\leftrightarrow}$, que hace referencia a las distintas etapas en las que se plasman las estrategias de investigación científica, desde la formulación de hipótesis (***fc***$_{\leftrightarrow}$ = 1) hasta su contraste, pasando por la transformación de los datos (***fc***$_{\leftrightarrow}$ = 2), la obtención de resultados (***fc***$_{\leftrightarrow}$ = 3) y la elaboración de las conclusiones (***fc***$_{\leftrightarrow}$ = 4) que llevan la verificación o refutación de las hipótesis planteadas a partir de la toma de decisiones (***fc***$_{\leftrightarrow}$ = 5), las cuales se adoptan en función de las conclusiones obtenidas.

Con el factor de la competencia ***fc***$_{\leftrightarrow}$ se pretende estudiar hasta qué punto los alumnos son capaces de dar respuesta a una cuestión científica cualquiera, independientemente de la tarea propuesta, utilizando sus conocimientos sobre la base de una estrategia de resolución de problemas. ***fc***$_{\leftrightarrow}$ también sirve para comprobar en qué etapas de la resolución tienden a presentarse dificultades de comprensión, menos destrezas o un menor desarrollo de habilidades, teniendo en cuenta la naturaleza del conocimiento conceptual y procedimental que se pone en juego, y el perfil de la actividad o prueba que se plantea (si es más teórica o experimental, descriptiva o interpretativa…)

Según el marco teórico de PISA 2006 (OCDE, 2006a), la competencia científica de una persona depende de las características cognitivas de ésta y de sus respuestas afectivas

hacia la Ciencia y los temas de carácter científico. Para ser competente en Ciencias, se ha de tener conciencia de las formas en las que la Ciencia y la Tecnología moldean nuestro entorno material, intelectual y cultural, y se requiere una disposición activa a implicarse en asuntos relacionados con la Ciencia y a comprometerse con las ideas científicas de manera reflexiva y crítica. En cuanto la evaluación de los aspectos afectivos, el marco teórico PISA 2006 incluyó escalas actitudinales que se consideraron un elemento adicional del perfil de la competencia científica, pero no computaron para la calificación total. Se utilizó un cuestionario mediante el que se obtuvieron datos descontextualizados sobre las actitudes de los alumnos, y una serie de ejercicios contextualizados que tenían por finalidad determinar si las actitudes medidas variaban según contextos o al sacarlas de contexto; también se pretendía comprobar existe una correlación entre la actitud y la eficacia en la resolución de las cuestiones científicas.

En esta investigación de Tesis, los aspectos actitudinales se evaluaron según las unidades de análisis que figuran en los anexos del ***Volumen B₂***. Se valoró el grado voluntario de asistencia a las clases, la participación en los debates en pequeño y gran grupo y el desempeño en el trabajo personal (atención, concentración, esfuerzo e implicación personal en la realización de las tareas).

Hasta aquí, la descripción de las categorías teóricas de análisis. A continuación se detalla cómo se seleccionaron los datos y se realizó la codificación de las unidades de análisis a partir de la información disponible, y cómo se procesaron los datos para obtener los resultados del aprendizaje realizado por los alumnos en términos de las competencias demostradas a medida que realizaban las actividades y pruebas planteadas.

Reconstruir las competencias de los alumnos requiere una transformación bastante compleja de la información de aula, con los problemas que ello implica: pérdidas de información, simplificaciones subjetivas, isomorfismos numéricos… Ya hemos indicado que, cualquiera que sea el método de análisis seleccionado, la complejidad de los procesos relacionados con la enseñanza no puede expresarse mediante relaciones simples de causa y efecto. A pesar de estas limitaciones, se puede determinar qué cambios se producen en el conocimiento de los estudiantes, y relacionarlos con las distintas situaciones de aprendizaje. La transformación de la información también ayuda a profundizar en el análisis del propio diseño experimental y en las conexiones que hay entre la información recogida en los materiales de trabajo y los resultados de la investigación.

Para hacer explícitas las competencias subyacentes en el discurso del alumnado y ordenarlas en niveles que indiquen el grado de eficacia de cada estudiante en la resolución de cuestiones de base científica, se determinó qué elementos de la competencia (unidades de análisis) utilizaron en sus respuestas a las distintas actividades y pruebas, y las competencias idiosincrásicas correspondientes se representaron numéricamente a partir de la suma del IC_1 (***potencialidad interpretativa del conocimiento***) y del IC_2 (***potencialidad de activación del conocimiento***), además del factor de resolución de

problemas $fc_{\leftarrow}$. Las competencias idiosincrásicas demostradas por los alumnos en un momento determinado del proceso de aprendizaje, se obtuvieron mediante la suma de los valores de competencia de todas las actividades o pruebas correspondientes.

La sistematización, organización y presentación de los datos se realizó mediante las tablas del análisis *item* a *item*, que constituyen el primer paso de la transformación de los datos brutos de aula. El contenido de las tablas *item* a *item* se volcó después en nuevas tablas, que denominamos de ***elementos de la competencia***. Se ha elaborado una tabla de análisis de ***EC***s para cada actividad o prueba analizada. Se identificaron más de 1000 ***EC***s, así que para automatizar el cálculo de los valores numéricos de los ***IC***s y de los niveles de competencia, el análisis del aprendizaje se ha realizado con *Microsoft Office Excel 2007*.

Los criterios seleccionados para evaluar el nivel de competencia ***NC*** (y el progreso en el mismo) son semicuantitativos. No se puede establecer una escala numérica absoluta, porque las competencias están en continuo desarrollo a lo largo de la vida, y solamente se pueden representar en un *continuum* de valores que dé idea de cómo las capacidades básicas, interrelacionadas, cada vez se hacen más complejas y avanzadas.

Los niveles de competencia ***NC*** estiman con qué eficacia los estudiantes hicieron uso de sus conocimientos científicos en la resolución de las cuestiones propuestas, en comparación con la movilización del conocimiento científico deseable. Ésta se mide en función de dos valores referenciales de competencia (***VRC***), elaborados por los investigadores de tal manera que permiten definir cinco niveles de competencia, en lugar de los seis niveles de PISA 2006 (OCDE, 2006a). En un principio se habían establecido solamente dos niveles (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2012), con el propósito de comparar las competencias de los estudiantes con respecto a un único valor referencial de la ciencia escolar. Pero, para diferenciar mejor los logros de aprendizaje, después se incluyó el establecimiento de un nuevo valor referencial de competencia, de manera que entre ambos delimitaran un número impar de niveles, como ha hecho Jiménez Aleixandre (2012); pero esta autora distingue tres niveles, y en esta investigación se han utilizado cinco. A continuación se describen los dos valores referenciales seleccionados:

El primer valor referencial de competencia representa la mínima movilización de conocimiento científico necesaria para dar respuesta a las cuestiones planteadas. Salvo en lo que se refiere a los aspectos actitudinales (para los cuales se adjudicó una escala referencial de actitudes que se detalla en los anexos del ***Volumen B***$_2$), el primer valor referencial de competencia se estableció sumando los valores de los ***IC***s y de $fc_{\leftarrow}$ correspondientes a las unidades de análisis que verifican el valor IC_2fc_1[I], es decir, que se consideran imprescindibles para resolver la cuestión. Los alumnos que no alcanzan este valor referencial, no resuelven la cuestión con una eficacia aceptable, y se encuentran en el nivel mínimo de competencia (NC_1).

El segundo valor referencial de competencia estima un grado de movilización de conocimiento que, desde el punto de vista de los objetivos de aprendizaje, consideramos

que es más que suficiente para resolver las cuestiones. Salvo para los aspectos actitudinales (que siguen la escala referencial de actitudes que se explica en el ***Capítulo III***, ***Volumen B***), el segundo valor referencial se determinó sumando la puntuación de los elementos de competencia que se consideran imprescindibles para resolver la cuestión (es decir, de los que verifican IC_2fc_1[I]), más la mitad de la que corresponde a los elementos relevantes, es decir, de las unidades de análisis con IC_2fc_1[R]. Los alumnos que superan este nivel de competencia despliegan una cantidad y calidad de conocimiento tal que llegan al máximo de competencia, al que denominamos NC_5, porque se han enunciado tres niveles intermedios al dividir en tres tercios iguales la distancia entre los dos valores de competencia referenciales. Los niveles NC_1, …, NC_5 se ordenan en sentido creciente de las capacidades que se espera que los alumnos utilicen para dar respuesta a las cuestiones planteadas. La comparación de los valores de competencia idiosincrásicos con los valores referenciales de la ciencia escolar a lo largo del tiempo permite estimar en qué grado esta evolución de conocimientos se dirigió hacia posturas más acordes con las científicas. En este sentido, el método de análisis del aprendizaje por competencias ofrece valiosa información sobre la capacidad de las propuestas didácticas para promover aprendizaje.

Con la determinación de los niveles de competencia idiosincrásicos asociados a diferentes momentos, se analiza el aprendizaje alcanzado en términos de las competencias desarrolladas a lo largo de la intervención, y la evolución de las mismas se puede relacionar con las propuestas didácticas.

El desplazamiento entre niveles de competencia idiosincrásicos a lo largo de las diferentes situaciones de aprendizaje indica avances o retrocesos en la evolución del conocimiento de los alumnos con respecto al aprendizaje que se esperaba que desarrollaran mediante las actividades de las unidades didácticas ensayadas.

Los niveles idiosincrásicos de competencia no se han asociado a las notas tradicionales, buscando no reducir la valoración del conocimiento a un cálculo numérico. Dado que se han determinado por comparación con dos valores referenciales que representan la movilización de los conocimientos deseables para las distintas baterías de actividades o pruebas implementadas, se trata de niveles relativos, no absolutos, que están vinculados a las ideas científicas adecuadas para cada momento de la evaluación.

Los cinco niveles de competencia establecidos se han aplicado a las competencias científica, matemática, lingüística, etc., y también a las distintas competencias que se han identificado. Así se puede estimar el mayor o menor desarrollo de las distintas competencias más simples que articulan la competencia científica, lo cual permite a los investigadores profundizar en las dificultades que exteriorizan los alumnos a la hora de utilizar sus conocimientos científicos en su vida personal y social.

También se puede comprobar qué relación existe entre las dificultades encontradas en el aprendizaje y el grado de dificultad de las actividades y pruebas, teniendo en cuenta que éste puede estimarse atendiendo a la puntuación total que alcance la tarea en sus ***fc***s.

Una actividad o prueba es tanto más difícil en Ciencias cuantas más de las siguientes características reúna: mucha integración de los dominios de representación del conocimiento (abundancia de valores IC_1fc_1[Mm]), la utilización de modelos complejos de la ciencia escolar (alta puntuación en IC_1fc_2), la coordinación de constructos pertenecientes a diferentes categorías ontológicas (variedad en los valores de IC_1fc_3), operaciones epistémicas de alto nivel (predominio de valores del tipo IC_1fc_4[Int]), la movilización de un gran número de constructos como requisito imprescindible (cantidad de valores IC_2fc_1[I]), la utilización de ideas con las que el alumno está poco familiarizado (predominio de IC_2fc_2[N] y IC_2fc_2[P] sobre IC_2fc_2[C]), la necesidad de buscar información u obtenerla mediante el razonamiento, y relacionarla con la ya disponible (alta frecuencia del valor IC_2fc_3[N], con variedad de valores para IC_2fc_4), así como la realización de un mayor número y complejidad de pasos que han de darse para dar una respuesta adecuada (puntuación global de $fc_{_}$).

Como sucede con el análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, cualquier *item* de las actividades o de las pruebas planteadas contiene información concreta sobre el conocimiento que se hace útil en cada caso y sobre la utilidad concreta con que los alumnos lo activan, independientemente de las pruebas utilizadas (IC_1). Así, el análisis por competencias permite evitar la replicación de las pruebas utilizadas para determinar cómo progresaron las ideas de los alumnos, identificando cómo evolucionó la potencialidad interpretativa que éstos atribuyeron a los constructos científicos a lo largo de la intervención, y cómo se modificó la potencialidad de activación del conocimiento en las distintas situaciones de aprendizaje (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2012).

Además, se puede comprobar hasta qué punto influye la naturaleza de las actividades y las pruebas planteadas sobre la activación de los conocimientos que se pretenden construir, porque el diseño del análisis permite relacionar la potencialidad de activación del conocimiento (IC_2) con el perfil de los *items* seleccionados, atendiendo a los factores que miden la importancia de los constructos termodinámicos en la resolución de la cuestión, la novedad de los mismos y su disponibilidad dependiendo de la información facilitada en el enunciado de la tarea y de las fuentes de información que se requieren.

De esta manera, mediante el análisis por competencias se puede estimar la capacidad efectiva de las propuestas ensayadas para promover avances duraderos en las competencias de los alumnos, esto es, un aprendizaje significativo de la ciencia escolar.

II.3.2.3. Descripción de las secuencias de actividades *Termoquímica* y *Termodinámica Química*

Las propuestas de actividades ensayadas se llevan al aula mediante dos conjuntos ordenados de actividades que conforman dos secuencias didácticas: *Termoquímica* (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2009, 2010, 2011, 2012) y *Termodinámica Química* (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008b). En los dos apartados siguientes se exponen todas las actividades que conforman las dos secuencias objeto de estudio.

Descripción de las actividades de la secuencia *Termoquímica*

La aplicación de esta propuesta en el aula constituye la llamada fase previa, mediante la cual el profesor y el alumnado se acomodaron a la nueva metodología. En esta fase previa, se fomentó la adaptación a la dinámica de trabajo que consideramos necesaria antes de la aplicación de la propuesta didáctica sobre *Termodinámica Química*.

A continuación se describen pormenorizadamente las quince actividades que componen la secuencia *Termoquímica*. Con estas actividades se pretende dar sentido a los principales conceptos y enunciados mediante los que la Ciencia aborda el tratamiento, desde el punto de vista termodinámico, de los sistemas materiales y de las transformaciones que en ellos tienen lugar. Al mismo tiempo, el conocimiento que se pretende promover en el proceso de aprendizaje involucra la explicitación y el desarrollo de destrezas, estrategias y procedimientos relacionados con el diseño, la planificación, la realización, el análisis, la discusión y la comunicación de experiencias de laboratorio.

La descripción de las actividades se organiza de la siguiente manera:

En primer lugar, se describen brevemente los objetivos de la actividad, indicando cuál es el planteamiento que se ha elegido para lograrlos. Se incluye en una *Figura* el guion de trabajo con el que se presenta la actividad, y se formula la cuestión o cuestiones problemáticas planteadas. A esta introducción le sigue la descripción de las tareas propuestas y la dinámica de trabajo que se recomienda para resolver la cuestión, indicando qué informaciones se facilitan a los alumnos mediante los textos de los guiones de trabajo y qué observaciones se realizarán en las actividades experienciales, cómo se propone que el docente dirija las observaciones e interpretaciones del alumnado y cuáles son las ideas clave en el proceso de resolución de las cuestiones planteadas. Se indican brevemente las principales dificultades de aprendizaje que pueden presentarse durante el desarrollo de cada actividad.

Bloque I: sistemas y procesos termodinámicos

El *Bloque I* está constituido por las cuatro primeras actividades, cuyos objetivos son ayudar a los alumnos a analizar los cambios que se producen en los sistemas materiales como consecuencia de los procesos termodinámicos, y fomentar la explicitación y el desarrollo de estrategias y destrezas relacionadas con el control y la manipulación de variables. Siguiendo la organización en fases que proponen Ollerenshaw y Ritchie (1997) para secuenciar y desarrollar las actividades, la secuencia *Fp01 – Fp04* cierra el ciclo de exploración (*Fp01*), indagación/reestructuración (*Fp02*) y aplicación (*Fp03*, *Fp04*).

Actividad Fp01: descripción termodinámica de un sistema físico

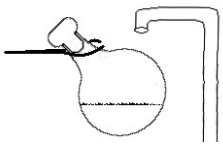
El *Bloque I* se inicia con la actividad *Fp01*, en la que se propone al alumnado definir y describir un sistema termodinámico y los principales cambios que éste experimenta como consecuencia de un proceso. Buscando enfocar el desarrollo de la actividad en la descripción de los estados del sistema, se analizará un fenómeno que los estudiantes ya

conocen (la ebullición) y que tiene lugar en un sistema sencillo compuesto por una sustancia que también les resulta familiar: el agua. Sobre esta base, se presentan las variables termodinámicas como propiedades de los sistemas materiales, útiles en la caracterización de los estados por los que éstos evolucionan. Los procesos termodinámicos se definen como cada una de las evoluciones posibles de un sistema desde un estado inicial hasta un estado final, en una serie de transformaciones que pueden involucrar transferencias energéticas con el entorno mediante procesos de calor y/o trabajo.

Para lograr estos objetivos, se plantea una experiencia de laboratorio sencilla mediante la cual los alumnos analizarán y compararán los cambios que experimenta el agua con la ebullición en condiciones de presión atmosférica y a presión diferente de la atmosférica. Se pone así de manifiesto la necesidad de atender tanto a los aspectos observables de los fenómenos, que pueden proporcionar datos valiosos para la resolución de cuestiones problemáticas, como al estudio sistemático de las propiedades físicas y químicas de los sistemas materiales. En este caso, el concepto clave para la resolución de la cuestión planteada es el punto de ebullición, relacionado con la cantidad de energía que las partículas del seno del líquido deben alcanzar para pasar al estado gaseoso.

Tabla 13: Guion de la actividad Fp01 – descripción termodinámica de un sistema físico

Actividad *Fp01*: descripción termodinámica de un sistema físico



En un recipiente abierto, pon a calentar agua sobre un mechero Bunsen o una placa calefactora. Cuando el agua comience a hervir, retira el recipiente de la placa calefactora y deja que el agua repose durante medio minuto. Tapa con cuidado el recipiente.

Ahora, traslada con cuidado el recipiente tapado con agua hasta colocarlo debajo de un grifo, y rocía el recipiente con un chorro de agua fría.

A. ¿Qué le sucede al agua caliente del recipiente:

1.- después de que haya reposado durante medio minuto?

2.- al colocarlo bajo el chorro de agua fría?

B. ¿A qué crees que se deben los fenómenos que observas?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

En esta primera aproximación al estudio termodinámico de los sistemas materiales, se revisan y reestructuran una serie de conceptos que el alumnado ya conoce (temperatura, presión, volumen, masa, composición química, calor, trabajo, energía), con el fin de integrarlos en un nuevo campo de conocimientos: la Termodinámica. A partir de las observaciones del alumnado, se promoverá el desarrollo de estrategias sobre la identificación y el control de las variables que describen los estados termodinámicos del

sistema: inicial, final, y algunos estados intermedios cuya caracterización proporciona datos para interpretar los aspectos fenomenológicos observados.

Al comienzo de esta actividad, los alumnos realizan la experiencia descrita y, en una primera etapa de observación autónoma, detallan por escrito sus observaciones y sus explicaciones. En cuanto a las observaciones que realizarán, destacamos que:

En primer lugar, cuando asciende a 100 ºC la temperatura del agua que se encuentra en el recipiente abierto sobre la placa calefactora, distinguirán la ebullición en condiciones de *p* atmosféricas (punto de ebullición estándar del agua: $T_{ebullición}$ = 100 ºC, $p_{ebullición}$ = 1 atm). Posteriormente, después de retirar el recipiente de la placa y dejar reposar el agua unos instantes, se observará que el agua deja de hervir, a medida que la temperatura desciende de los 100 ºC.

Durante el breve tiempo que se deje reposar el agua, consideramos conveniente que el recipiente se mantenga abierto, para que los alumnos puedan percibir claramente que, hasta este momento de la experiencia, la presión permanece constante en el valor de 1 atm. Tras tapar el recipiente, en cuanto se coloque éste bajo el chorro de agua "fría" del grifo, los alumnos apreciarán un hecho *a priori* sorprendente: es posible hacer que el agua hierva a temperatura inferior a 100 ºC y, lo que es más, es posible hacer que el agua *caliente* "hierva al enfriarla". Esta ebullición tiene lugar en condiciones no estándar, con un punto de ebullición $T_{ebullición} < 100$ ºC, $p_{ebullición} < 1$ atm.

Una vez que los alumnos anoten sus observaciones y debatan en pequeño grupo las posibles causas de los fenómenos observados, se hará una puesta en común, en gran grupo, en la que explicitarán sus ideas (etapa de observación autónoma).

A continuación, el profesor guiará la atención los estudiantes hacia la construcción de los conceptos necesarios para describir y explicar los procesos que han sucedido. En esta etapa de observación dirigida, se pretende hacer ver al alumnado la necesidad de identificar, definir y describir los conceptos básicos de la Termodinámica:

Se explicitará, en primer lugar, la conveniencia de definir un sistema termodinámico y su entorno. Teniendo en cuenta que la descripción e interpretación dinámica de los hechos, fenómenos y situaciones siempre se basa en el análisis de unos datos que se conocen y/o se obtienen sobre las propiedades de un sistema (objeto de estudio), en este caso, es conveniente definir como sistema el agua (tanto líquida como gaseosa) contenida en el recipiente.

Es importante que los alumnos perciban las interacciones que se realizan entre el sistema y el entorno mediante procesos de transferencia de materia y/o procesos de transferencia de energía (calor, trabajo). Este es el punto de partida para construir la clasificación de los sistemas termodinámicos atendiendo a las relaciones con el entorno.

En la cuestión que se presenta, el sistema se define como abierto mientras el recipiente no está tapado, puesto que se transfiere materia con el entorno (emisión de

vapor de agua), y por tanto también se transfiere energía. La liberación de agua en estado gaseoso durante la ebullición a 100 ºC es claramente observable; no lo es tanto la transferencia que se produce por evaporación a menos de 100 ºC, y en especial a temperatura cercana a la ambiente; puede recurrirse a recordar al alumnado qué le sucedería al agua si se la mantuviera a 20 ºC durante unas horas o días en el laboratorio. Desde el momento en que se tapa el recipiente, el sistema pasa a clasificarse como cerrado, puesto que los cambios que en él se producirán en adelante ya no involucrarán transferencias de materia entre el sistema y el entorno.

Conviene establecer esta clasificación de los sistemas termodinámicos sobre la base de el hecho de que el sistema intercambie materia con su entorno (lo cual sucede en los sistemas abiertos, pero no en los cerrados ni en los aislados) y el hecho de que el sistema intercambie energía con su entorno (lo que introduce la distinción entre los sistemas cerrados y los aislados), distinguiendo estas situaciones de la posibilidad de que el sistema intercambie materia con su entorno. Se debe enfatizar en que la circunstancia de que el recipiente que contiene al sistema se halle abierto a la atmósfera, no es condición necesaria y suficiente para clasificar el sistema como abierto: no se trata de comprobar si el sistema "podría transferir" materia o energía con su entorno, sino de analizar si el sistema efectivamente realiza estas transferencias. Identificar las transferencias de materia no suele presentar demasiadas dificultades para los estudiantes: en general no les resulta difícil reconocer los casos en los que el sistema libera materia (por ejemplo emitiendo gases), y también los casos en los que al sistema se le adiciona materia (por ejemplo, incorporando a la mezcla de reacción un catalizador en un proceso cuya velocidad se pretende modificar). La identificación de las transferencias de energía puede introducirse mediante el análisis de los cambios en las variables termodinámicas básicas: el cambio de temperatura se relaciona con las transferencias de energía por calor, y el cambio de presión o volumen se relaciona con las transferencias de energía por trabajo (mecánico).

Ha de tenerse en cuenta que, para muchos alumnos, un sistema químico no transfiere energía por trabajo con el entorno. Posiblemente esta idea alternativa se alimenta en el entorno académico, porque los aspectos mecánicos solamente se analizan en profundidad cuando se estudian los sistemas que experimentan procesos físicos (Carson y Watson, 1999). Para superar esta dificultad puede utilizarse la idea de que un sistema gaseoso siempre realiza trabajo sobre el entorno, ya sea sobre la atmósfera o sobre las paredes del recipiente que contiene el gas.

Al analizar las transferencias de energía, puede incorporarse el criterio de signos convencional (recomendado por la IUPAC) para las magnitudes calor y trabajo. Aunque no es objetivo de esta actividad desarrollar representaciones algebraicas de los conceptos trabajados, consideramos interesante hacer hincapié, siempre que se tenga ocasión, en la idea de que toda representación algebraica se establece por consenso de manera que permita expresar cómodamente y con precisión las relaciones entre los conceptos que involucra. En este caso, las representaciones que corresponden a las escalas de medida de

los conceptos científicos sirven al interés "egoísta" de analizar si el sistema que se analiza "gana" o "pierde" energía / materia.

Se pueden desarrollar también, en esta misma línea, las ecuaciones que representan las definiciones de los procesos de calor y trabajo, con la intención de reforzar las relaciones conceptuales entre los procesos de transferencia de energía y las variaciones de las variables termodinámicas básicas temperatura, presión y volumen:

Acerca del trabajo w, se hará explícita relación con las variables presión p y variación de volumen ΔV en la ecuación de estado de los gases ideales:

$$w_{\text{mecánico}} = -p \cdot \Delta V = -\Delta n \cdot R \cdot T$$

siendo n el número de moles del sistema y R la constante de los gases ideales.

Acerca del calor, se pondrá en juego el conocimiento implicado en la ecuación que relaciona el calor con la variación de temperatura:

$$q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

siendo m la masa y c el calor específico de la sustancia considerada.

Se introducirá entonces la idea de que, cuando en Termodinámica básica se analizan transferencias de energía, siempre se hace formulan como intercambios netos. Así, cuando por ejemplo se enuncia una transferencia por calor desde un vaso con agua "caliente" (a alta temperatura) a la atmósfera o a nuestra mano, esta afirmación no pretende indicar que la atmósfera o nuestro cuerpo no transfieran energía al vaso y al agua que éste contiene; solamente se enuncia el resultado neto del balance energético sistema-entorno.

Ya hemos anunciado que la principal intención de esta actividad es hacer surgir en el alumnado la necesidad de explicitar una serie de propiedades del sistema que permiten describir su estado. Como estas propiedades dependen únicamente del estado del sistema, enunciando los cambios que se producen en estas propiedades podemos describir los cambios que el sistema experimenta entre dos estados termodinámicos dados. Estas propiedades del sistema, funciones de estado del mismo, son las variables termodinámicas. En el nivel educativo que nos ocupa y desde el punto de vista de la Termodinámica Clásica, que solamente analiza los estados inicial y final del sistema (y quizás algún estado intermedio que sea importante en la interpretación de los procesos de interés), los cambios que se producen en las variables termodinámicas se estudiarán siempre como variaciones, simbolizadas como Δ[*variable*], sin entrar en consideraciones teóricas de mayor complejidad que exigen desarrollar nociones de cálculo diferencial (incluidas derivadas parciales). Solamente en la actividad *Fi03* de la secuencia sobre Termodinámica Química se introducirá, a título informativo para el alumnado, la nomenclatura diferencial en la definición macroscópica de la entropía (ver *Fi03*). En todo caso, la introducción de las variaciones (Δ) de las variables termodinámicas debe fundamentarse sobre la base del concepto de estado termodinámico: durante cualquier

proceso, el sistema evoluciona a lo largo de una serie de estados que se suceden unos a otros sin que podamos analizarlos uno por uno; por lo general, el análisis dinámico de los procesos se limita al estudio de los cambios que los sistemas experimentan entre los estados que delimitan el proceso (inicial y final). En relación con esto, conviene hacer explícitas dos ideas:

En primer lugar, se destacará que la ciencia solamente ha logrado determinar con precisión la mecanística de procesos muy sencillos que tienen lugar en sistemas muy simples y en condiciones extremas y controladas en laboratorio, alejadas de las condiciones en las que habitualmente se producen estas transformaciones en la naturaleza. Pero esta limitación no impide analizar los procesos desde el punto de vista termodinámico, porque el potencial interpretativo que tienen los diversos modelos de partículas, enlace químico y reacción química actuales (y no tan actuales) es suficiente para cumplir el principal objetivo de la Termodinámica: establecer las causas de que los sistemas evolucionen tal como lo hacen en las condiciones en las que lo hacen, y detallar en lo posible las características energéticas de estas transformaciones.

En segundo lugar, se hará hincapié en la idea de que el concepto de evolución termodinámica del sistema, esto es, de evolución entre estados termodinámicos, es totalmente independiente del tiempo que dura el proceso; el paso de un estado termodinámico a otro solamente depende de que el sistema sufra un cambio en al menos una de las propiedades que definen su estado, y el mayor o menor intervalo de tiempo en que este cambio se produzca es irrelevante desde el punto de vista termodinámico. Como el lenguaje cotidiano nos predispone a describir cualquier cambio en términos temporales, consideramos conveniente ayudar a los alumnos a cuidar las expresiones que utilizan para hacer explícitas sus ideas sobre los cambios termodinámicos, y a reflexionar sobre la influencia del lenguaje en la construcción del conocimiento. Ya hemos hablado, en este sentido, de la importancia de que las expresiones cotidianas "entren" en el aula de ciencias, para proporcionar a los estudiantes la oportunidad de que perciban cuáles son las limitaciones del lenguaje cotidiano y cómo y por qué el lenguaje científico constituye una herramienta comunicativa más eficaz.

Por lo general, la utilización de las expresiones temporales es evitable si se utiliza la información termodinámica sobre los estados entre los cuales el sistema evoluciona; sin embargo, puede hacerse casi ineludible cuando se trata de describir cambios que sobre los que no se dispone de datos termodinámicos, porque sin datos sobre las magnitudes termodinámicas no podemos definir los estados termodinámicos concretos a los que nos referimos. A este respecto, siempre debe enfatizarse en la necesidad de expresar los cambios del sistema en términos de estados termodinámicos y utilizando las variables que los definen, al margen de los "matices" temporales, que parecen hacer confluir la cuestión cinética con la termodinámica. Sin embargo, debe evitarse una utilización continuada y artificial de un lenguaje absolutamente atemporal en toda circunstancia, porque esto nos obligaría a construir un discurso plagado de circunloquios que, aunque sea riguroso

desde el punto de vista del lenguaje científico, oscurece la comprensión y desposee el lenguaje científico de sencillez y cierta naturalidad. Si pretendemos convencer al alumnado de que adopte el lenguaje científico por la gran capacidad comunicativa que éste proporciona, debemos insistir en el rigor y precisión que lo caracterizan sin convertir su uso en una permanente obsesión de "asepsia expresiva". Para ello, recomendamos que el docente ayude a los alumnos a ser conscientes de que la utilización de expresiones temporales en termodinámica debe eliminarse en lo posible, porque es un abuso del lenguaje y como tal debe evitarse; pero los estudiantes deben ser igualmente conscientes de que ciertos abusos de lenguaje pueden ser un mal menor cuando se trata de construir un discurso inteligible. Por ejemplo, la expresión "sistema periódico" es en sí un abuso de lenguaje, puesto que el sistema de ordenación de los elementos químicos no presenta ninguna periodicidad; sí son periódicas las propiedades químicas (y físicas) sobre las que se ha construido el sistema de ordenación. ¿Se debe, pues, eliminar del lenguaje científico la expresión "sistema periódico", sustituyéndola por la más precisa "sistema de ordenación de los elementos químicos basado en la periodicidad de sus propiedades (fisico)químicas"? Parece que la comunidad científica es unánime en su respuesta: el abuso de lenguaje, en este caso, es incomparablemente más útil que la expresión adecuada (y enrevesada), siempre y cuando no se pierda de vista el significado y el sentido científico de los conceptos y procedimientos involucrados.

En esta primera actividad se desarrollarán las siguientes variables termodinámicas básicas: la cantidad de materia (que habitualmente se cuantifica por la masa m y el número de moles n), la composición del sistema (que suele desglosarse como composición en fases y composición química), la presión p, el volumen V y la temperatura T.

Al detallar el concepto de composición en fases, se estará en condiciones de construir la clasificación de los sistemas atendiendo a esta propiedad: en un estado termodinámico dado, los sistemas pueden considerarse homogéneos o heterogéneos, dependiendo de si constan de una sola fase o de más de una. Se hará hincapié en que la homogeneidad o heterogeneidad del sistema se define para cada estado termodinámico, y por tanto, a lo largo de un proceso el sistema puede dejar de ser (o pasar a ser) homogéneo o heterogéneo en cada evolución de un estado a otro. Al introducir estas nociones, ha de prestarse atención a las confusiones terminológicas entre las expresiones "cambio de estado termodinámico" (evolución del sistema entre dos estados termodinámicos definidos) y "proceso de cambio de estado" (proceso físico en el que una sustancia experimenta un cambio en su estado de agregación). También se verificará que los alumnos identifican adecuadamente la diferencia entre estado de agregación y fase.

Teniendo en cuenta los objetivos que hemos seleccionado para las propuestas didácticas objeto de análisis (basados en los análisis curricular y científico del contenido académico), hemos decidido no desarrollar relaciones conceptuales o procedimentales sobre el concepto de interfase, considerando que omitir el análisis de las transferencias de materia y/o energía entre diferentes partes del sistema no supone ninguna limitación

interpretativa en la praxis. La utilidad descriptiva e interpretativa de estas relaciones no es mayor que la de los modelos microscópicos de la Química. Por ello, hemos optado por omitir la primera e insistir en el desarrollo y aplicación de los modelos de partículas, enlace químico y reacción química al estudio de los procesos termodinámicos. Además, la primera actividad se ha diseñado de manera que la elección del sistema objeto de estudio sea lo suficientemente libre como para que los alumnos puedan resolver el problema independientemente del sistema que elijan.

Se hará hincapié en la necesidad de describir los estados termodinámicos del sistema, no sólo los cambios producidos en él. La introducción de las magnitudes termodinámicas como propiedades definitorias del estado del sistema, puede ayudar a superar la identificación que muchos alumnos sostienen entre variables como la temperatura o, en algunos casos, la energía interna (que son funciones de estado del sistema), y el calor, que es un proceso (Martínez y Pérez, 1997).

El concepto de proceso termodinámico surge a partir de la idea del cambio de estado termodinámico. Este cambio, que el sistema experimenta cuando se produce alguna variación en al menos una de sus propiedades función de estado, puede delimitarse entre dos estados concretos del sistema, el estado inicial y el estado final, que son caracterizables por ser, respectivamente, el estado en que el sistema comienza a evolucionar (estado inicial) y el estado en el que dejan de producirse cambios en las variables del sistema (estado final). Ha de prestarse atención a la posible confusión terminológica entre el "proceso termodinámico" y los "procesos de transferencia de energía" (calor y trabajo), puesto que los alumnos suelen tener más dificultades para interiorizar conceptos pertenecientes a la categoría ontológica de los procesos que para los clasificables como objetos (Chi *et al.*, 1994), y la idea de que un proceso (termodinámico) involucre procesos (de transferencia de energía) puede no ser tan evidente para ellos, especialmente si se están enfrentando a la reasignación de categoría ontológica para el calor y/o el trabajo, desde la categoría de los objetos a la categoría de los procesos.

Se hará explícito que los procesos se realizan a lo largo de un "camino termodinámico", conformado por una serie de estados del sistema a través de los cuales éste evoluciona. Puede introducirse en este punto, si el docente lo considera oportuno, la clasificación de los procesos en abiertos o cerrados según el camino seguido por el sistema en su evolución: si los estados inicial y final son iguales uno a otro en todas sus variables, el sistema ha seguido un camino cerrado en su evolución, y el proceso se define como cíclico. En los procesos cíclicos, puesto que el estado final es el mismo que el inicial, el valor de la variación de cualquier función de estado es cero. Se subrayará entonces que, en los procesos cíclicos, las transferencias de energía (calor, trabajo) no tienen por qué adoptar el valor cero, puesto que tanto el calor como el trabajo son procesos, y por ello no tiene sentido físico definir una cantidad de calor o trabajo para un estado concreto del sistema. Calor y trabajo se definen como balances de energía entre el sistema y el entorno, independientemente de los estados entre los que evoluciona el sistema.

A juicio del docente, puede mencionarse también la clasificación de los procesos termodinámicos en procesos isotérmicos, isobáricos, isocóricos y adiabáticos. Una vez más, se utiliza la idea de las variables termodinámicas como función de estado y del calor como proceso: los procesos isotérmicos, isobáricos e isocóricos se definen en función de que una de las variables termodinámicas básicas (temperatura, presión y volumen, respectivamente) no varíe durante el proceso, o lo que es lo mismo, que su variación sea nula. Por su parte, los procesos adiabáticos se definen como aquéllos en los que no se transfiere energía por calor, es decir, que la cantidad de calor involucrado es cero.

Trabajados todos estos conceptos y relaciones durante la etapa de observación dirigida, se procederá a la etapa de explicación argumentativa, en la que los alumnos, con ayuda del profesor, elaborarán un discurso interpretativo acorde con la ciencia escolar, para describir y justificar los cambios sucedidos en el sistema. La respuesta termodinámica (macroscópica) a los fenómenos observados se fundamenta en el control de las variables termodinámicas del sistema, cuyo comportamiento se explica en términos de la relación *p*-*T* para un sistema cuyo *V* es constante por hallarse limitado por una pared indeformable:

La primera ebullición del agua que observarán los alumnos, se produce en las condiciones estándar, a 100 ºC y 1 atm de presión (sistema "abierto a la atmósfera", y abierto en sentido termodinámico, puesto que transfiere materia al entorno). Posteriormente, se tapa el recipiente y con ello se impiden las transferencias de materia (sistema cerrado). En estas condiciones, y dado que las paredes del sistema son indeformables, al disminuir la temperatura del sistema por ponerse éste en contacto prolongado con un entorno a menor temperatura (el agua del grifo, a temperatura ambiente), la presión en el interior del recipiente disminuye bruscamente. La disminución de la presión por debajo de la atmosférica rebaja la temperatura de ebullición del agua, y por ello el fenómeno de ebullición se observa a una temperatura inferior a 100 ºC.

La interpretación microscópica de estos fenómenos pasa por considerar la justificación del proceso físico de ebullición utilizando el modelo de partículas (complementado, si el docente considera oportuno, con el de enlace): la ebullición es un cambio de estado que tiene lugar cuando las partículas del sistema (en este caso, las moléculas de agua) tienen una cantidad de energía tal que pueden vencer las interacciones que establecían con las partículas vecinas (en este caso, puede apelarse al enlace de hidrógeno e interacciones de London). Vencidas estas interacciones que las retenían en el seno del líquido, las partículas de agua con energía suficiente pasan a estado gaseoso, en el que las interacciones con sus partículas vecinas son despreciables, y se consideran inexistentes, en el caso de un gas ideal, y muy débiles en caso de un gas real. El hecho de que la temperatura del sistema permanezca constante durante el proceso de ebullición se debe a que, mientras queden partículas retenidas en el estado líquido, la energía que se aporte al sistema no se invertirá en aumentar la energía cinética promedio de las partículas (lo que se manifestaría en un aumento de la temperatura). En el seno del

líquido, esta energía se invierte en vencer las interacciones establecidas entre las partículas, y en el seno del gas, se invierte en los choques entre las partículas que ya se hallan en estado gas, y en los choques con las paredes del recipiente y con las partículas que se hallan en la película de contacto entre las fases líquida y gaseosa. En el momento en que todas las partículas del sistema hayan alcanzado la energía suficiente para pasar al estado gaseoso, la energía aportada al sistema sí se manifestará en un aumento de temperatura perceptible.

Los alumnos pueden retener en la memoria el dato de la temperatura de ebullición del agua en condiciones de presión atmosférica: el agua hierve a 100 ºC. Sin embargo, este dato de temperatura solamente indica cuál es la energía cinética promedio que las moléculas de agua necesitan para vencer las interacciones que establecen en estado líquido a presión atmosférica; en otras condiciones de presión, el umbral de energía que "libera" a las partículas del estado líquido será mayor o menor dependiendo de la mayor o menor fuerza de las interacciones que se establecen en el seno del líquido. Frente al dato de temperatura de ebullición, hay que considerar el punto de ebullición, que sí da idea de la energía que se necesita para realizar el cambio de estado dependiendo de las condiciones a las que se someta el sistema (temperatura y presión):

En condiciones de presión atmosférica, las moléculas de agua alcanzan la energía suficiente para pasar masivamente al estado gas cuando el sistema alcanza los 100 ºC de temperatura. A presión inferior a 1 atm, las interacciones entre las moléculas de agua son más débiles que a 1 atm de presión, y por ello podrán vencerse aportando al sistema una menor cantidad de energía que la que se necesita para que el agua tenga una energía cinética promedio correspondiente a los 100 ºC. En condiciones de presión superiores a la atmosférica, las interacciones que se establecen entre las moléculas de agua en estado líquido son más difíciles de vencer, y la cantidad de energía que ha de aportarse para que las partículas "escapen" al estado gaseoso excede de la que se corresponde con los 100 ºC.

Trabajadas estas ideas con relación a un sistema físico sencillo, la actividad *Fp02* aporta información al alumnado sobre la energía de los sistemas termodinámicos. Posteriormente, el primer *Bloque de actividades* finalizará con las actividades de aplicación *Fp03* y *Fp04*, cuyo objetivo es que los alumnos transfieran sus conocimientos a la interpretación de dos fenómenos concretos: la reacción entre Zn y HCl (*Fp03*) y el ciclo de reacciones de hidrólisis – síntesis del agua (*Fp04*).

Actividad Fp02: la energía en los sistemas termodinámicos

En esta actividad se facilita información al alumnado sobre el concepto de energía interna y sobre el primer principio de la Termodinámica. Las relaciones que se trabajan en esta actividad integran, reestructuran y amplían las que se hicieron explícitas en la primera actividad, al tiempo que se introduce de manera formal la simbología matemática relacionada con los balances energéticos sistema-entorno, formulados en términos de calor, trabajo y energía interna.

Como todas las actividades de indagación/reestructuración, la actividad *Fp02* plantea al alumnado un texto en el que se exponen las ideas que serán objeto de aprendizaje. Estas ideas se exponen de modo que resulten comprensibles para el alumnado de este nivel, sin perder de vista el objetivo de que los estudiantes se familiaricen con el léxico y los estilos de redacción característicos de los textos científicos. No olvidemos que entre las competencias científicas trabajadas en las dos propuestas didácticas se encuentran la compresión y asimilación de información, identificar descripciones e interpretaciones científicas y utilizar, interpretar y evaluar pruebas; también se pretenden trabajar aspectos relacionados con la competencia en comunicación lingüística, y en particular, comprender, interpretar y elaborar mensajes relacionados con las Ciencias de la naturaleza.

Tabla 14: Guion de la actividad Fp02 – la energía en los sistemas termodinámicos

Actividad *Fp02*: la energía en los sistemas termodinámicos

Ya conoces los procesos de calor y trabajo, mediante los cuales los sistemas pueden transferir (intercambiar) energía con su entorno. Como el calor y el trabajo son procesos, no propiedades de los sistemas, no tiene sentido hablar de "contenido" de calor o de trabajo de un sistema.

Si llamamos ΔE a la variación de energía que experimenta un sistema debido a las transferencias de energía con su entorno, y si q es el calor y w es el trabajo, podemos enunciar:

$$\Delta E = q + w$$

Esta es la expresión más conocida del primer principio de la Termodinámica, que enuncia: existe una función de estado extensiva E, energía total del sistema, tal que, para cualquier proceso en un sistema cerrado, se verifica $\Delta E = q + w$.

O, lo que es lo mismo, la energía que se transfiere (ΔE) entre sistema y entorno, se transfiere mediante dos procesos: calor (q) y trabajo (w).

La suma ($q + w$) sí es una propiedad del sistema, función de estado del mismo.

A la energía total E de un sistema termodinámico contribuyen tres términos:

- energía cinética macroscópica E_c, debida a la velocidad del sistema
- energía potencial macroscópica E_p, debida a la influencia de campos externos sobre el sistema (por ejemplo, campos gravitatorios, eléctricos…)
- energía interna U, debida a los movimientos e interacciones de las partículas del sistema

$$E = E_c + E_p + U$$

En Química, por lo general se prefiere trabajar con sistemas cerrados, en reposo ($E_c = 0$) y no sometidos a influencia de campos externos ($E_p = 0$, si consideramos despreciable el efecto del campo gravitatorio terrestre sobre el sistema). Así pues, la expresión del primer principio de la Termodinámica para un sistema químico suele enunciarse: $E = U$.

Por lo tanto:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = q + w$$

La variable U depende de la cantidad de materia del sistema, porque se debe a los movimientos e interacciones de las partículas del mismo. Es, por tanto, una función de estado extensiva, cuya variación ΔU es independiente del camino termodinámico seguido durante cualquier proceso, y sólo depende de los estados inicial y final del sistema.

En un proceso cíclico, pues, $\Delta U = 0$.

Si trabajamos con sistemas cerrados, en los que la masa es constante, para hacer variar la U del sistema necesitaremos provocar en él procesos de transferencia de energía: q y/o w.

Cuando un sistema intercambia energía con su entorno mediante los procesos de calor y/o trabajo, en todo caso la energía total del universo (la del sistema más la del entorno) se mantiene constante. Por ello, cuando se produce cualquier proceso termodinámico, siempre se cumple:

$$\Delta E_{universo} = \Delta E_{sistema} + \Delta E_{entorno} = 0$$

Este enunciado nos dice que la energía no puede ser creada ni destruida, sino solamente transferida.

Es decir, siempre que se produzca una variación en la energía del sistema $\Delta E_{sistema}$, esta variación va siempre acompañada de una variación de energía del entorno $\Delta E_{entorno}$ tal que

$$\Delta E_{entorno} = -\Delta E_{sistema}$$

El primer principio de la Termodinámica, como hemos visto, introduce una función de estado del sistema llamada E, energía total del sistema. Podemos, pues, decir que la expresión

$$\Delta E_{universo} = \Delta E_{sistema} + \Delta E_{entorno} = 0$$

surge directamente del primer principio. De hecho, el enunciado de Clausius para el primer principio dice:

«En cualquier proceso termodinámico, la energía del universo es constante.»

Así, el primer principio de la Termodinámica constituye un principio de conservación de la energía.

El desarrollo que se propone para esta actividad comienza con la lectura individual del texto. Después, se realizará un debate en pequeño grupo con el objetivo de que los alumnos discutan las principales ideas del texto y las relacionen con las que han trabajado en la actividad *Fp01*. Después de esta fase de debate por grupos, durante la que el docente regulará el grado de intervención que requiere su papel de guía dependiendo del funcionamiento interno de los grupos, se realizará un intercambio de ideas en gran grupo. Mediante este debate final, se pretende apoyar la construcción de conocimiento con la puesta en común de las ideas que han surgido a lo largo de estas dos primeras actividades, resaltando la utilidad de los constructos trabajados y clarificando aquellas ideas que precisen un mayor desarrollo.

Además de atender a la introducción de la notación matemática y las operaciones algebraicas para expresar de forma rigurosa y cómoda las principales relaciones sobre los balances de calor y trabajo entre sistema y entorno, recomendamos hacer hincapié en la naturaleza de las relaciones que se analizan en esta actividad, y en especial el primer

principio de la Termodinámica. Con esta actividad puede desarrollarse la idea de que los enunciados científicos proporcionan descripciones e interpretaciones que se basan en conceptos y modelos científicos y que, por tanto, tienen un ámbito de aplicación y unas limitaciones concretas que derivan de las bases teóricas. El enunciado científico no es una "verdad" o un dogma, ni un reflejo de la realidad tal como es, sino un instrumento que la Ciencia utiliza para tender un puente entre el mundo natural y nuestras interpretaciones.

El primer *Bloque* de la secuencia *Termoquímica* finaliza con las actividades *Fp03* y *Fp04*, diseñadas para que los alumnos apliquen y reestructuren las ideas trabajadas a lo largo de las dos primeras actividades, poniendo en juego el primer principio y la conservación de la energía para interpretar hechos y fenómenos concretos. Desde nuestra perspectiva, el docente debe guiar a los alumnos en la utilización reflexiva de estos enunciados científicos, insistiendo siempre en la necesidad de analizar sus ámbitos de aplicación y limitaciones, y fundamentando cualquier interpretación construida alrededor de los enunciados, sobre la base de los conceptos y modelos que lo articulan. Avanzar en esta dirección requiere que el docente ayude a los estudiantes a elaborar interpretaciones cuyo fundamento no sean los enunciados termodinámicos (o cualquier otro enunciado científico), sino sus bases teóricas y experimentales. A este respecto, las expresiones que el profesor utilice pueden evitar que el alumnado recurra a la utilización irreflexiva o dogmática de los enunciados científicos. Por ejemplo: a la pregunta "¿por qué si con la mano sostengo un objeto en alto y luego lo suelto, éste cae al suelo?", una respuesta recurrente es: "cae por la ley de la gravedad". Cuando un científico utiliza esta afirmación, está apelando implícitamente a conceptos como masa, campo gravitacional… y cualquier interlocutor experto comprende el sentido de esta respuesta. Sin embargo, en el contexto del aula, esta afirmación puede reforzar la concepción alternativa de las leyes y principios científicos como verdades o dogmas, si se acepta como razonamiento válido que *el fenómeno se explica así porque la ley se tiene que cumplir*, y acostumbra que el alumnado recurra a citar sentencias para despachar sin explicación una cuestión problemática.

Actividad Fp03: descripción termodinámica de un sistema químico

La actividad *Fp03* propone a los alumnos el análisis termodinámico de una reacción redox sencilla. Se pretende con ello que los alumnos transfieran sus conocimientos a la explicación de una situación, un hecho o un fenómeno nuevo.

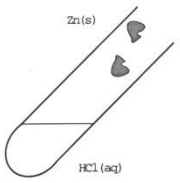
Nuevamente, se enfrenta al alumnado a un proceso termodinámico (en concreto, una reacción química redox) en cuyo transcurso tienen lugar una serie de cambios en el sistema. Los fenómenos que el alumno observará (observación autónoma) como consecuencia de la reacción química son: un apreciable incremento en la temperatura del tubo de ensayo, la disolución del zinc sólido, y el desprendimiento de un gas.

El objetivo didáctico de esta actividad es que el alumno, al realizar la experiencia de laboratorio, perciba los cambios producidos en el sistema durante el proceso de reacción química entre el $Zn_{(s)}$ y el $HCl_{(aq)}$. Se describen a continuación los aspectos en los

que el profesor dirigirá las observaciones de los alumnos para ayudarles a construir una explicación argumentativa de los fenómenos observados:

Tabla 15: Guion de la actividad Fp03 – descripción termodinámica de un sistema químico

Actividad *Fp03*: descripción termodinámica de un sistema químico



En la figura se representa un tubo de ensayo que contiene ácido clorhídrico diluido, $HCl_{(aq)}$, y al que se le añade cinc, $Zn_{(s)}$:

$$Zn_{(s)} + 2\ HCl_{(aq)} \rightarrow H_{2\ (g)} + ZnCl_{2\ (aq)}$$

Realiza esta experiencia utilizando granalla de cinc y una disolución de ácido clorhídrico 1:1.

A. Observa y describe los cambios que observas.

B. Interpreta dichos cambios.

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

La interpretación de los fenómenos observados pasa necesariamente por definir un sistema objeto de estudio; en este caso, es conveniente definir como sistema la mezcla de reacción, a fin de que la composición del sistema no incluya sustancias ajenas al proceso de reacción química (por ejemplo, el aire).

Es posible que los alumnos planteen la idea de considerar como sistema el volumen de materia contenido en el tubo de ensayo. A este respecto, el profesor hará hincapié en la validez de cualquier elección a la hora de elegir el sistema objeto de estudio, siempre y cuando se especifique de forma clara y detallada. La negociación de ideas y la adopción de convenios mediante el consenso colectivo cobra aquí gran importancia, puesto que esta situación de aula abre la vía al debate de diferentes alternativas para el estudio de un mismo fenómeno, y plantea la conveniencia de adoptar la idea más idónea a través de la negociación. A opción del profesor, podría incluirse más de una definición de *sistema* en la discusión de los fenómenos observados; por ejemplo, los alumnos podrían dividirse en grupos según la definición de sistema que hayan elegido a la hora de explicar termodinámicamente el proceso de reacción química.

Durante el proceso de reacción, el sistema evoluciona desde un estado inicial compuesto por $Zn_{(s)}$ y $HCl_{(aq)}$, hasta un estado final donde además existen $H_{2\ (g)}$ y $ZnCl_{2\ (aq)}$. Se hará explícito que, aunque pocas reacciones pueden considerarse cuantitativas (*totales*), en muchos casos sí es posible asumir que la cantidad de reactivos que permanecen sin reaccionar es despreciable a la hora de estudiar las transferencias energéticas; en concreto, esta reacción ofrece un buen ejemplo de proceso químico que puede suponerse *cuantitativo*, siempre y cuando la evolución del sistema se estudie desde el punto de vista cualitativo y se observe la completa disolución de la masa de Zn sólido.

De este modo, la ecuación química adquiere sentido como representación simbólica de la evolución del sistema desde el estado inicial, representado en el primer miembro de la ecuación, hasta el estado final, representado en el segundo miembro.

En cuanto a la composición del sistema en fases, se destacará que, tanto en el estado inicial como en el final, el sistema es heterogéneo. Durante el proceso de reacción química varía su composición en fases, debido a la desaparición de la fase sólida. Además, el desprendimiento del hidrógeno gaseoso constata la aparición de una nueva fase, si se ha definido como sistema termodinámico el sistema reaccionante; constata una variación en la composición de la fase gaseosa, si se ha elegido como sistema termodinámico el volumen de materia contenido el tubo de ensayo.

- La temperatura del sistema aumenta como consecuencia de la reacción química, claramente exotérmica. Aunque no sea éste el objetivo con que ha sido diseñada la actividad, quizá el profesor considere adecuado este momento de la intervención para introducir el concepto de exotermia/endotermia.
- La presión del sistema se mantiene en todo momento en torno al valor de 1 atm, puesto que, aunque el hidrógeno gaseoso realiza un trabajo de expansión contra el entorno, el tubo de ensayo está abierto a la atmósfera, y las variaciones en la presión del sistema resultan inapreciables si no se tapa el tubo de ensayo.
- El volumen del sistema aumenta durante el proceso de reacción química, si se considera como sistema termodinámico al sistema reaccionante en su conjunto. Para el caso del sistema definido como el contenido del tubo de ensayo, el volumen es una variable controlada durante el proceso de reacción.
- La composición del sistema varía durante la reacción.
- Asimismo, la cantidad de materia del sistema varía durante el proceso, puesto que el tubo de ensayo permite el intercambio de materia con el exterior.
- El sistema objeto de estudio es un sistema abierto, que realiza transferencias de materia y de energía con su entorno.
- Se produce una transferencia de materia desde el sistema hacia el entorno, debido a la liberación de gas hidrógeno a la atmósfera y al aumento de temperatura del sistema; ambos factores causan un aumento en la presión del gas contenido en el tubo (aire enriquecido en hidrógeno), lo cual provoca un flujo neto de gas al entorno.
- Las transferencias de energía entre el sistema y el entorno incluyen:
- Calor: se manifiesta a través del aumento de la temperatura del sistema
- Trabajo: el hidrógeno gaseoso producido en la reacción realiza un trabajo de expansión contra la disolución, la atmósfera y las paredes del tubo.

Así pues, la variación de energía interna que tiene lugar como consecuencia del proceso termodinámico es:

$$\Delta U = q + w_{exp}$$

Ha de recordarse que tanto q como w dependen del camino recorrido por el sistema. La suma (q + w), sin embargo, es función de estado y, por tanto, independiente del camino seguido en la transformación termodinámica.

Llegados a este punto, se hará explícito el balance molar de las fases gaseosa y líquida, a fin de que el alumnado acepte la idea de que la evolución de los sistemas termodinámicos conduce, al cabo de un tiempo, a un estado final de equilibrio químico, mecánico y térmico. Se introduce así la condición de equilibrio termodinámico, que implica la verificación simultánea de los tres equilibrios.

El repaso de la noción de equilibrio térmico brinda la oportunidad de presentar al alumnado el principio cero de la Termodinámica: *cuando dos sistemas se hallan en equilibrio térmico con un tercero, lo están entre sí.*

Actividad Fp04: el móvil perpetuo de primera especie

La actividad *Fp04* cierra el *Bloque I* de la secuencia *Termoquímica*. Es, además, la primera de las tres actividades de aplicación mediante las que se pretenden desenvolver aspectos CTS referidos a problemas medioambientales y sociales: la actividad *Fp04* y la actividad *Fp14* se centran en el análisis de problemas relacionados con la gestión de los recursos energéticos, mientras que la actividad *Fp15* trata el tema de la nutrición humana.

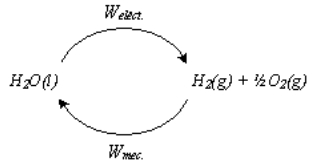
La principal intención educativa de esta actividad es que los alumnos utilicen sus conocimientos para construir un razonamiento explicativo mediante el cual den respuesta a un problema abierto relacionado con su vida cotidiana: el funcionamiento del motor de explosión, partiendo del ciclo termodinámico en que se fundamenta.

Sobre la base de la *eficiencia* de las máquinas térmicas en términos de trabajo y calor, se introducirá un debate en gran grupo sobre las repercusiones sociales, medioambientales y económicas de las centrales térmicas.

Los alumnos han de identificar el motor como una máquina que transfiere energía mediante procesos de trabajo, procesos que permiten disponer de una cantidad de energía adecuada para diversos propósitos de interés doméstico o industrial. La identificación del motor de explosión como una máquina térmica es el punto de partida para que los alumnos realicen un análisis termodinámico del ciclo en dos tiempos que se describe en el planteamiento de la actividad.

En este caso, resulta conveniente definir el motor como sistema termodinámico. Así, la pared que separa el sistema del entorno coincide con la superficie material en la que se detectan las transferencias de energía motor - exterior: la carcasa del motor y las piezas que lo conectan al dispositivo de interés.

Tabla 16: Guion de la actividad Fp04 – el móvil perpetuo de primera especie



Actividad *Fp04*: el móvil perpetuo de primera especie

En la figura se muestra esquemáticamente el proceso termodinámico en el que se basa el funcionamiento de un motor de explosión.

Como puedes ver, se trata de un proceso cíclico en el cual intervienen sustancias químicas que ya conoces (agua, hidrógeno gaseoso y oxígeno gaseoso), y en cuyo transcurso tienen lugar transferencias de energía por trabajo mecánico (debido a la expansión de los gases) y por trabajo eléctrico.

A. ¿Cómo explicarías termodinámicamente el funcionamiento de un motor de explosión?

B. Si un amigo te dice que está pensando en comprarse una segadora cuyo motor consume una cantidad de energía menor que el trabajo que realiza, ¿qué le aconsejarías? Explícalo.

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

El proceso que tiene lugar en el sistema (motor) es cíclico. Esto tiene varias implicaciones importantes:

El estado inicial y el estado final del sistema coinciden, sea cual fuere el estado inicial considerado a la hora de describir el ciclo. Es conveniente tomar como estado inicial el compuesto por agua en estado líquido, puesto que el agua es el *combustible* de este motor.

La variación de cualquier función de estado es cero, dado que el estado inicial y el final *son el mismo* (el sistema presenta los mismos valores en sus funciones de estado tanto en el estado inicial como en el final).

Se diferenciarán dos etapas en el camino termodinámico: una primera etapa consistirá en la electrolisis del agua, y en la segunda etapa se cerrará el ciclo, al regenerarse el combustible a partir de los elementos constituyentes del agua.

La composición del sistema queda explicitada en la figura incluida entre los materiales del alumnado. Se trata de un sistema homogéneo tanto en su estado inicial como en su estado final. En el estado inicial, el sistema está constituido por una fase líquida compuesta por agua; en su estado final, si se supone que la reacción es cuantitativa, el sistema estaría constituido por una fase gaseosa compuesta por O_2 y H_2.

Se explicitarán, para este sistema termodinámico, las transferencias de materia y de energía que se producen entre el sistema (motor) y el entorno, tanto en la etapa 1 del ciclo (electrolisis del agua) como en la etapa 2 (regeneración del agua).

En cuanto a las transferencias de materia, debe destacarse que el motor necesita de una periódica fuente de alimentación de combustible para continuar funcionando, puesto

que la energía que se pretende transferir al entorno por trabajo *útil* procede de una reacción de combustión. Los gases liberados de la combustión, en este caso, son oxígeno e hidrógeno. Nuevamente se enfatizará en la necesidad de diferenciar entre las transferencias reales y las transferencias netas, tanto de materia como de energía, que se producen en los sistemas. En cuanto a las transferencias de energía, se explicitarán:

- Calor: aunque en un motor ideal no se verificarían transferencias de energía por calor al entorno, estas transferencias sí suceden en los motores reales.
- Trabajo: un motor de explosión en dos tiempos, como el de la figura, requeriría que, en el primer tiempo (etapa 1 del ciclo) se le aportase energía mediante un proceso de trabajo eléctrico. La electrolisis de cada mol de combustible agua generaría 1,5 mol de gases (hidrógeno y oxígeno), los cuales, en expansión controlada por pistones, realizarían un trabajo de tipo mecánico contra el entorno. Al revertir la reacción (etapa 2 del ciclo, o segundo tiempo del motor), los gases resultantes de la eletrólisis regenerarían el combustible, lo cual implicaría un trabajo mecánico relacionado con la contracción del sistema; la energía transferida podría ser aprovechada para hacer funcionar el dispositivo de interés. De este modo, parte de la energía transferida al sistema por trabajo eléctrico se transferirá al entorno a través de trabajo mecánico. En este motor, se producirá trabajo mecánico en los dos tiempos del motor: trabajo de expansión del sistema en el primer tiempo (aprovechable, por ejemplo, para empujar un pistón), y trabajo de contracción del sistema en el segundo tiempo (con lo cual el motor tiraría del pistón hasta devolverlo a su posición original).

Con esta actividad se pretende, en primer lugar, que el alumnado relacione los conceptos que ya conoce para identificar las transferencias de materia y de energía que el motor establece con el entorno. Como el proceso termodinámico que ocurre en el sistema es cíclico, $\Delta U_{ciclo} = 0$, y la cantidad de energía transferida *hacia* el sistema debe ser igual a la transferida *desde* el sistema. En este sentido, se enfatizará en las diferencias entre un motor ideal y un motor real, atendiendo al primer principio de la Termodinámica:

Desde un punto de vista coherente con el primer principio de la Termodinámica, el *motor ideal* no intercambiaría con su entorno energía por los procesos de calor o trabajo de vibración mecánica, sino solamente por trabajo *útil*, o de expansión y contracción del sistema. Este *motor ideal*, sin embargo, es incompatible con lo establecido en el segundo principio. Aunque en este momento no se pretende incluir nociones termodinámicas relativas al segundo principio, sí es posible hacer explícita para los alumnos la evidencia experimental de que en cualquier máquina, incluso las de mejor rendimiento, siempre se verifican procesos no deseados (rozamiento entre las piezas *físicas* de la máquina, aumentos de temperatura asociados al rozamiento…) que impiden alcanzar un *rendimiento* del 100%. Esta idea de rendimiento servirá, en la actividad *Fp04* de *Termodinámica Química*, de introducción a las limitaciones del segundo principio.

El motor real, en cambio, libera energía al entorno a través de los procesos de calor y de trabajo (de vibración y trabajo *útil*). Todas las *pérdidas* de energía descritas son las responsables de que la aportación de energía al sistema sea siempre superior a la producción de energía utilizable por parte del sistema.

Mediante el problema de la segadora, la actividad introduce una situación problemática de trascendencia histórica en el desarrollo de la Termodinámica: la imposibilidad de construir el *móvil perpetuo de primera especie*. Se pretende así que el alumnado construya la misma conclusión a la que llegó la comunidad científica: partiendo del primer principio de la Termodinámica, es imposible construir una máquina que transfiera al entorno una cantidad neta de energía mayor que la que previamente se le ha aportado; una situación tal sería posible sólo durante un breve período de tiempo, en el que el sistema perdería parte de su energía interna y, con ello, perdería estabilidad. La tendencia a estabilizarse para alcanzar el equilibrio llevaría al sistema a absorber energía del entorno, de modo que la cesión (transferencia) neta de energía por parte del sistema no será nunca mayor que la energía aportada desde el entorno.

Partiendo de este planteamiento, este momento de la intervención es adecuado para hacer surgir un debate, en gran grupo, sobre la insostenibilidad energética de las centrales térmicas. Con este debate se pretende:

Que los alumnos reflexionen sobre el papel de las *máquinas térmicas* en nuestra sociedad: las máquinas térmicas se hallan presentes en multitud de dispositivos y maquinarias, desde los motores de los automóviles, hasta en las gigantescas turbinas de vapor de los generadores eléctricos. El funcionamiento de las centrales térmicas se basa precisamente en este mecanismo.

Que los alumnos sean conscientes de la baja eficiencia de las centrales térmicas, entendidas como máquinas térmicas que hacen funcionar las turbinas con vapor sobrecalentado a unos 560 ºC. A consecuencia de la fricción, las *pérdidas* (transferencias al entorno) de energía por calor, y diversas complicaciones de carácter técnico, la eficiencia máxima que alcanza una turbina de vapor es de un 40-60%, lo que significa que por cada tonelada de carbón consumida en la central, sólo se genera electricidad a partir de una cantidad de energía equivalente a la combustión de 0,40-0,60 toneladas de carbón. El resto de la energía obtenida en la combustión se transfiere al entorno por calor, tal que la temperatura de los alrededores puede alcanzar los 40 ºC (Chang, 1999, p. 736).

La baja eficiencia de las máquinas térmicas permite introducir un debate, en gran grupo, sobre las alternativas energéticas sostenibles y eficientes frente a la quema de combustibles como el carbón, el petróleo o el biodiesel. Con este debate se pretende, fundamentalmente, fomentar actitudes relacionadas con la valoración crítica de la actividad científica e industrial y de sus repercusiones sociales y medioambientales.

Posteriormente, en la actividad *Fp14*, este debate sobre la energía y la sostenibilidad adquirirá una nueva dimensión, al complementarse esta perspectiva

termodinámica, macroscópica, con la perspectiva microscópica de los modelos cinético molecular y de enlace. La integración del concepto macroscópico de ΔH y de los modelos microscópicos de la Química, permitirá discutir las propiedades de los combustibles desde el punto de vista químico.

Bloque II: aplicación de la perspectiva termoquímica a fenómenos de interés

En el *Bloque II*, que comprende las actividades desde la *Fp05* hasta la *Fp15*, se presenta al alumnado el conjunto de conceptos y leyes, de procedimientos y estrategias, mediante los cuales la Termoquímica aborda el análisis de los procesos energéticos implicados en las reacciones químicas.

El principal objetivo de las actividades del *Bloque II* es ayudar a los alumnos a establecer nuevas relaciones útiles en la descripción y la interpretación las transferencias energéticas que se producen en los sistemas cuando éstos experimentan procesos termodinámicos. Para dotar de significado a los conceptos termodinámicos y ofrecer una perspectiva teórica más funcional, el planteamiento de las actividades recurre a los modelos microscópicos de la Química. En concreto, mediante los modelos cinético molecular y de enlace se relacionará la estructura corpuscular de la materia con las transferencias de energía de los sistemas químicos (a nivel macroscópico, ΔH).

Otro objetivo destacado de este *Bloque* de actividades es lograr que los alumnos expliciten y desarrollen destrezas, estrategias y técnicas relacionadas con el diseño, la planificación, la realización, el análisis, la discusión y la comunicación de experiencias de laboratorio. Con este fin, los estudiantes llevarán a cabo experimentos mediante los que verificarán o refutarán hipótesis relativas a la descripción, interpretación y predicción de los aspectos energéticos asociados a las transformaciones químicas.

El *Bloque II* comienza con la actividad *Fp05*, en la que se plantea a los alumnos la necesidad de determinar el calor puesto en juego en un proceso químico, ya sea en condiciones de volumen constante o de presión constante.

En la actividad *Fp06* se introduce la utilidad de la variación de entalpía como convenio para determinar el calor puesto en juego en los procesos que tienen lugar a presión constante. Mediante esta actividad, se subraya la importancia de disponer de datos de ΔH asociados a los procesos físicos y químicos de interés.

A lo largo de las actividades *Fp07* – *Fp10* se aborda una de las cuestiones más importantes y antiguas de la Termoquímica: la calorimetría, técnica experimental cuyos orígenes se remontan a los experimentos de Lavoisier, Laplace y Joule, y mediante la que se determinan experimentalmente los calores asociados a las reacciones químicas en condiciones controladas.

En la actividad *Fp11* se informa al alumnado sobre las leyes de la Termoquímica (Ley de Lavoisier-Laplace y ley de Hess). Con la aplicación de las leyes termoquímicas, se pretende que los alumnos pongan en juego destrezas y estrategias de cálculo, de

tratamiento y de representación gráfica de resultados experimentales relacionados con las transferencias energéticas asociadas a las reacciones químicas.

Estas relaciones y destrezas se desarrollan a lo largo de las actividades *Fp12*, *Fp13* y *Fp14*, que enfrentan al alumnado con situaciones problemáticas cuya resolución requiere aplicar las leyes de la Termoquímica. Se pretende así que los estudiantes reestructuren sus ideas y construyan una visión global de los conceptos, procedimientos y estrategias básicas de la Termoquímica; esto incluye el análisis interpretativo de sistemas termodinámicos sencillos mediante el reconocimiento, el control y el procesamiento de variables.

Fuera del ámbito macroscópico de la Termodinámica, las tres últimas actividades de la secuencia presentan al alumnado una descripción microscópica de los aspectos termodinámicos. Esta nueva perspectiva, relacionada con la estructura de la materia, complementa y da sentido a la perspectiva macroscópica de las reacciones químicas. La integración de los dominios macroscópico y microscópico de la Química, juntamente con el simbólico, ayudará a los alumnos a adquirir y hacer útil un marco teórico y procedimental funcional y fructífero a la hora de describir, interpretar y predecir situaciones, hechos y fenómenos desde el punto de vista termodinámico.

Actividad Fp05: calor de reacción, a V = cte y a p = cte

La actividad *Fp05* comienza presentando una afirmación ya conocida: la cantidad de energía transferida por calor desde o hacia un sistema durante un proceso depende de las condiciones en las que tenga lugar el proceso (el calor no es una función de estado).

Mediante esta actividad de exploración se pretende hacer explícitas las ideas del alumnado sobre la dependencia del calor de reacción con respecto a las condiciones de la reacción. Además, se pretende que los alumnos se familiaricen con la representación gráfica de las transferencias energéticas asociadas a las reacciones químicas.

Con esta actividad se plantea a los alumnos la importancia de determinar el calor puesto en juego en un proceso químico, ya sea en condiciones de volumen constante (como es el caso de las reacciones que tienen lugar en recipiente cerrado) o en condiciones de presión constante (en el caso de reacciones en recipiente abierto a la atmósfera).

Se explicitará que, siempre que se analice una reacción química que tenga lugar en recipiente abierto a la atmósfera, es poco recomendable definir como sistema el volumen de materia contenido en el recipiente, sobre todo si existen reactivos o productos gaseosos. Elegir este sistema obligaría a estudiar las transferencias de materia entre el sistema y el entorno, y complicaría la aplicación del primer principio. Si se define como sistema termodinámico el sistema reaccionante, se evita el estudio de las transferencias de materia y se simplifica el tratamiento conceptual y algebraico del problema planteado.

Esta actividad ofrece la posibilidad de introducir dos relaciones termodinámicas: identificar la variación de la energía interna del sistema con la cantidad de energía

transferida por calor durante una reacción a volumen constante, y desarrollar que la cantidad de energía transferida por calor durante una reacción en condiciones de presión constante es diferente a la transferida por calor en condiciones de volumen constante.

Tabla 17: Guion de la actividad Fp05 – calor de reacción, a V = cte y a p = cte

Actividad *Fp05*: calor de reacción, a *V* = cte y a *p* = cte

A 25 °C, la reacción representada por la siguiente ecuación química:

$$2\ C_{(s)} + O_{2\ (g)} \rightarrow 2\ CO_{(g)}$$

transfiere energía por calor al entorno. En concreto, libera al entorno 113,0 kJ de energía por cada mol de carbono, cuando la reacción se lleva a cabo en un recipiente cerrado (es decir, a volumen constante).

A. ¿Crees que se transferirá la misma cantidad de energía por el proceso calor si llevamos a cabo esta reacción a 25 °C en recipiente abierto? Justifica tu respuesta.

B. Calcula la cantidad de energía que se transfiere por calor cuando se lleva a cabo la reacción en recipiente abierto.

C. Representa en un diagrama las variaciones de energía que experimenta el sistema durante esta reacción:

en condiciones de V constante;

en condiciones de p constante.

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

En primer lugar, se identificará la variación de la energía interna del sistema con la cantidad de energía transferida por calor durante una reacción a volumen constante, relación que se deriva del primer principio de la Termodinámica.

Según el primer principio, toda la energía que se intercambia entre el sistema y su entorno es transferida por los procesos de trabajo y calor. Si un sistema experimenta un proceso termodinámico en condiciones de volumen constante, no se producen transferencias de energía entre el sistema y su entorno mediante trabajo; entonces, toda la variación de energía interna que experimenta el sistema se debe a transferencias por calor:

En efecto, $\Delta U = q_V + w$ (para un sistema cerrado)

En condiciones de volumen constante: q_V = -113,0 kJ/mol

Puesto que $w = -p \cdot \Delta V = 0$, se verifica que $\Delta U = q_V$ = -113,0 kJ/mol

En segundo lugar, se especificará que la cantidad de energía transferida por calor durante una reacción en condiciones de presión constante es diferente a la transferida por calor en condiciones de volumen constante.

Nuevamente, el razonamiento argumentativo que da respuesta a este problema se basa en el primer principio:

En condiciones de presión constante, la variación de energía interna que experimenta el sistema se debe a dos procesos: calor, y trabajo mecánico (de expansión/contracción de gases).

En este caso, por cada mol de gas consumido en la reacción, se producen dos mol de gas. El balance molar de la reacción es, pues: $\Delta n_{gas} = +1$. El aumento en el número de moles de gas trae como consecuencia un aumento del volumen del sistema; la expansión de los gases es la responsable de que el sistema realice un trabajo mecánico contra el entorno, tal que:

$$w = -p \cdot \Delta V = -\Delta n_{gas} \cdot R \cdot T = - [(1 \text{ mol}) \cdot (8{,}31 \text{ J/mol·K}) \cdot (298 \text{ K})] = -2476 \text{ J} = -2{,}5 \text{ kJ}$$

Parte de la energía que se transfiere entre sistema y entorno se invierte, pues, en el proceso de trabajo relacionado con la variación de volumen del sistema. Para el caso de esta reacción, y dado que el sistema realiza un trabajo neto contra el entorno, la contribución del proceso calor a la transferencia neta de energía total será menor que la que tiene lugar si la reacción se lleva a cabo en condiciones de volumen constante.

En efecto:

$$\Delta U = -113{,}0 = q_p + w = q_p + (-2{,}5 \text{ kJ})$$

Es decir:

$$q_p = -110{,}5 \text{ kJ}$$

Para conocer el calor de reacción en estas condiciones, ha de introducirse una nueva variable de estado cuya variación coincida con la cantidad de energía transferida a presión constante. Esta variable de estado es la entalpía *H*, sobre la cual se informará a los alumnos en la actividad de reestructuración *Fp06*.

Consideramos que esta definición del concepto de entalpía puede contribuir a cuestionar una idea alternativa que desde la literatura científica se ha constatado muy arraigada entre los alumnos: la identificación de la entalpía con la energía interna, el calor o la temperatura, e incluso con la capacidad calorífica (Beall, 1994; Thomas y Schwenz, 1998; Carson y Watson, 1999).

Actividad Fp06: utilidades de la entalpía y de su variación

La actividad *Fp06* tiene por objetivo repasar y reestructurar las ideas trabajadas hasta este momento de la intervención. Se pretende, en particular, que los alumnos relacionen los conceptos de energía interna y entalpía con las transferencias energéticas que tienen lugar durante los procesos termodinámicos.

En Química, muchas las reacciones que se llevan a cabo en laboratorio y en la industria tienen lugar en recipiente abierto a la atmósfera. De ahí la importancia y la utilidad de la variable *H*: la variación que experimenta la *H* de un sistema en el transcurso de cualquier proceso es uno de los descriptores termodinámicos en Química.

Tabla 18: Guion de la actividad Fp06 – utilidades de la entalpía y de su variación

Actividad *Fp06*: utilidades de la entalpía y de su variación

Ya hemos visto que la energía transferida por calor depende de las condiciones en las que tenga lugar el proceso. En Química, a veces interesa realizar las reacciones en recipiente cerrado; por ejemplo, si el producto que queremos obtener es sensible al oxígeno o a la humedad del aire. Una reacción de este tipo es un proceso a volumen constante, durante el cual las transferencias energéticas sistema – entorno se deben exclusivamente al calor.

Sin embargo, muchas de las reacciones químicas se realizan en recipiente abierto a la atmósfera. En estas condiciones (de presión constante), hay que tener en cuenta que las transferencias de energía posibles no sólo se deben al calor, sino también al trabajo que realizan las sustancias en fase gaseosa, sobre todo si hay reactivos o productos gaseosos, o vapores desprendidos de líquidos puros o de disoluciones.

Como sabes, la Termoquímica es la parte de la Termodinámica que se basa en el primer principio de la Termodinámica. A través de los conceptos de la Termoquímica, podemos analizar los aspectos energéticos de las reacciones químicas.

Del primer principio se deduce que:

- En caso de las reacciones a V = cte, si el sistema es cerrado (es decir, m = cte), el calor transferido q_V a volumen constante es:

$q_V = \Delta U$ donde q_V es el calor transferido a V = cte.

- El caso que más nos interesa en Química es el de las reacciones a p = cte (en recipiente abierto a la atmósfera). En este caso, hay que tener en cuenta que el sistema puede realizar trabajo $w = -p \cdot V$. Por ello, si queremos conocer el calor a presión constante, qp, nos interesa definir una nueva función de estado: la entalpía del sistema, H:

$q_p = \Delta U + p \cdot \Delta V = \Delta H$ donde q_p es el calor intercambiado a p = cte.

Si en la reacción intervienen gases (ideales), $\Delta H = \Delta U + n \cdot R \cdot T$.

Si intervienen solamente sólidos y líquidos, las variaciones de volumen que experimentará el sistema durante la reacción serán despreciables, y podemos considerar $w = 0$; por tanto $\Delta H \approx \Delta U$.

La Termodinámica no permite conocer valores de U ni de H, sino solamente variaciones de U y de H (esto es, ΔU y ΔH), si determinamos la energía transferida. Por eso se suele llamar a ΔH "calor de reacción", aunque debemos recordar que ΔH no es el calor de reacción, sino que coincide con el calor de reacción a p = cte.

Además, H es una función de estado, y por tanto ΔH es independiente del camino seguido. Por ello, podemos calcular q_p como la variación de entalpía ΔH aunque la presión varíe durante la reacción, siempre y cuando la presión en los estados inicial y final sea la misma.

El concepto de entalpía es válido no sólo para las reacciones químicas, sino para cualquier proceso termodinámico. Por ejemplo, en los procesos de cambio de estado, en los que aparece en el sistema una nueva fase sin que haya tenido lugar una reacción química, existen también transferencias de energía a través de q y w. Si el sistema es cerrado y el proceso tiene lugar en condiciones de p = cte, el calor se conoce como "calor latente", $q_L = \Delta H$.

Una idea más: como hemos visto, durante las reacciones químicas se transfiere energía mediante el proceso calor. En Química, es importante conocer

el sentido de estas transferencias: ¿la energía se transfiere desde el sistema hacia el entorno, o desde el entorno hacia el sistema? O, lo que es lo mismo: cuando tenga lugar la reacción, ¿el sistema absorberá energía del entorno, o liberará energía al entorno? Esta información nos la aporta el signo de *q*.

Si el sistema cede (desprende) energía al entorno, $q < 0$, y se dice que la reacción es exotérmica.

Si, por el contrario, el sistema absorbe (toma) energía del entorno a través del proceso calor, $q > 0$, y la reacción se denomina endotérmica.

No es difícil darse cuenta de la importancia de esta información. Por ejemplo: si queremos llevar a cabo una reacción muy exotérmica en un reactor industrial, nos conviene rodear el sistema de un medio que absorba energía de forma controlada. La solución más adecuada consiste en encerrar el reactor dentro de una "camisa de refrigeración", es decir, una carcasa dentro de la cual se hace circular un fluido. Las camisas de refrigeración, al lograr que las transferencias de energía sean más controlables, alargan la vida útil del reactor y, lo que es más importante, proporcionan una medida de seguridad que evita accidentes. Los fluidos refrigerantes más utilizados en industria son aire, aceite y agua. El hielo, o mezclas agua/hielo o hielo/sal, no suelen emplearse, para evitar peligrosos choques térmicos entre el sistema reaccionante y el fluido refrigerante.

Respecto a la introducción de la función *H*, destacaremos dos recomendaciones que la investigación educativa sugiere tener en cuenta:

En primer lugar, ha de evitarse que los alumnos identifiquen la variación de entalpía asociada a una reacción como la energía implicada en la reacción. Esta idea alternativa se ha encontrado en 12 de cada 16 alumnos universitarios (Carson y Watson, 1999). Proponemos para ello hacer hincapié en la naturaleza de ΔH no como sinónimo de "la energía puesta en juego durante una reacción, bien sea aportada a la misma o liberada de la misma", sino como un estimador del calor asociado a una reacción cuando ésta tiene lugar en condiciones de presión constante.

En segundo lugar, se enfatizará en la idea de que mediante la Termodinámica sólo se pueden conocer valores de ΔU, y de ΔH, pero no de *U* ni de *H*. La confusión entre las variables termodinámicas (como *U* ó *H*) y sus correspondientes variaciones es una constante en las ideas alternativas de los alumnos, y en ocasiones, resulta promovida por el lenguaje y la terminología utilizada por los profesores y los libros de texto (Beall, 1994).

Presentado el concepto de entalpía, las actividades *Fp07* – *Fp10* se centran en el estudio de la calorimetría, técnica experimental mediante la que se obtienen los datos numéricos de ΔH asociados a reacciones químicas de interés. Dado que en el currículo oficial de la asignatura de Química para 2º de Bachillerato figura como práctica prescriptiva la determinación calorimétrica relacionada con la neutralización NaOH-HCl, hemos considerado interesante convertir esta reacción ácido-base en el eje central de la serie de actividades *Fp07*, *Fp08*, *Fp09* y *Fp12*. Con este propósito, hemos consultado las orientaciones elaboradas por el grupo de trabajo de Química-LOGSE (PAAU) y los materiales editados por el I.C.E. de Santiago de Compostela en la Colección Investigación Educativa (XUGA, Decreto 126/2008, del 19 de junio; Mendoza Rodríguez *et al.*, 2001). La

secuenciación de estas actividades se ha estructurado de modo que, en primer lugar, se plantee a los alumnos el diseño y la planificación de una experiencia de laboratorio útil para la determinación de la ΔH asociada al proceso de disolución del hidróxido de sodio en agua (Actividad *Fp07*). Esta actividad servirá de base al docente para guiar las ideas del alumnado hacia un diseño concreto de experiencia calorimétrica que será realizada en el laboratorio a través de la actividad *Fp08*. Seguidamente, la actividad *Fp09* propone la determinación experimental de la ΔH asociada a la reacción de neutralización entre una disolución de ácido clorhídrico y la disolución de hidróxido de sodio preparada y analizada en la actividad *Fp08*.

En la actividad *Fp10* se pretende que el alumnado revise y reestructure las ideas que se hicieron explícitas a lo largo de las actividades anteriores.

La secuenciación de las actividades *Fp07* – *Fp10* está orientada a, por un lado, fomentar la construcción de procedimientos y estrategias adecuadas para el diseño y la planificación de experiencias de laboratorio; por otro lado, se pretende evitar la restricción implícita que suele observarse en los alumnos en cuanto a la validez de ΔH en la descripción termodinámica de los procesos químicos (Carson y Watson, 2002). La estimación de la ΔH asociada a un proceso de disolución puede contribuir a no reforzar la tendencia generalizada de limitar la aplicación de ΔH exclusivamente al análisis de las reacciones de neutralización.

Llegados a este punto de la intervención, a través de la actividad *Fp11* se ofrecerá información al alumnado sobre las leyes de la Termoquímica (Ley de Lavoisier-Laplace y ley de Hess). La actividad *Fp12* ha sido diseñada para que los alumnos transfieran sus conocimientos de Termoquímica al cálculo de la ΔH asociada a la reacción de neutralización entre hidróxido de sodio sólido y una disolución acuosa de ácido clorhídrico; para resolver la situación planteada se requiere aplicar las Leyes Termoquímicas a procesos termodinámicos ya conocidos (*Fp07*, *Fp08* y *Fp09*).

Actividad Fp07: para el trabajo de laboratorio, la planificación es lo primero

La actividad *Fp07* enfrenta al alumnado a la posibilidad de determinar experimentalmente la variación de entalpía asociada al proceso de disolución del hidróxido de sodio en agua. Se pretende con ello que los alumnos pongan de manifiesto el carácter funcional del conocimiento científico, al establecer relaciones que les permitan diseñar y planificar experiencias de laboratorio útiles para verificar o refutar las hipótesis.

En concreto, en esta actividad se pide a los alumnos que diseñen y planifiquen una experiencia para determinar el calor asociado al proceso de disolución del hidróxido de sodio en condiciones de presión constante.

Al comienzo de la actividad, los alumnos han de relacionar el aumento de temperatura producido al disolver NaOH sólido en agua, con el signo de la variación de entalpía asociada al proceso de disolución. Se trata de que el alumnado tenga presentes

las transferencias de energía que tienen lugar entre el sistema y su entorno durante el proceso de disolución.

Tabla 19: Guion de la actividad Fp07 – para el trabajo de laboratorio, la planificación es lo primero

Actividad *Fp07*: para el trabajo de laboratorio, la planificación es lo primero

Ya conoces la función de estado entalpía, *H*, cuya variación nos indica el calor en un proceso termodinámico a presión constante.

Muchas de las reacciones que se realizan en los laboratorios de Química tienen lugar en recipiente abierto a la atmósfera, o lo que es lo mismo, a presión constante $p \approx 1$ atm. Por ello, resulta muy útil disponer de datos de las ΔH asociadas a procesos físicos o químicos, y medidas a 1 atm de presión.

Un ejemplo de proceso termodinámico interesante es la disolución de sustancias químicas en agua. En concreto, nos centraremos en la disolución de una base fuerte: el hidróxido de sodio (NaOH), compuesto iónico que se conoce como "sosa cáustica". El NaOH se comercializa en forma de escamas o lentejas sólidas, y fue utilizado en el pasado para la preparación de jabones, puesto que reacciona con los ácidos grasos para producir ésteres.

$$NaOH_{(s)} \rightarrow Na^{+}_{(aq)} + OH^{-}_{(aq)}$$

A. Si a un volumen de agua, a temperatura ambiente, añadimos lentejas de NaOH y agitamos, podremos observar cómo el termómetro nos indica que la temperatura de la disolución aumenta a medida que el hidróxido de sodio se disuelve. ¿Cómo crees que será la variación de entalpía asociada al proceso de disolución del NaOH en agua? ¿Por qué?

B. Propón y explica alguna estrategia para conocer el calor asociado a la disolución del NaOH en agua.

C. ¿Qué otras técnicas, precauciones e información consideras necesarias o convenientes antes de llevar a cabo tu estrategia para determinar el calor de disolución del hidróxido de sodio? Justifica tu respuesta.

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Si se define como sistema termodinámico la disolución (sistema cerrado), la aplicación del primer principio es sencilla: dado que no se involucra ninguna fase gaseosa en el proceso de disolución, puede considerarse que las transferencias energéticas no involucran trabajo de expansión de gases, si consideramos despreciable el volumen de agua transferido al entorno por evaporación. Por tanto, todas las transferencias de energía que tienen lugar entre sistema y entorno se deben al proceso calor.

Este razonamiento encierra la idea clave de los métodos calorimétricos. Es posible estudiar las transferencias de energía que tienen lugar en un sistema si se conocen las variaciones que experimentan ciertas variables del sistema que son función de estado:

- Las variaciones de presión y/o de volumen del sistema indican que entre sistema y entorno existe una transferencia neta de energía por trabajo.
- La variación de temperatura del sistema indica una transferencia neta de energía por calor entre sistema y entorno.

El objetivo principal de esta actividad es que los estudiantes diseñen y planifiquen una experiencia de laboratorio que haga útiles sus conocimientos sobre Termoquímica. Con esta finalidad, se pedirá a los alumnos que expliciten sus propias ideas sobre el diseño de una estrategia experimental adecuada para determinar el calor asociado al proceso de disolución del NaOH. Mediante la puesta en común y el debate de las ideas que surjan en el aula, se pretende que la emisión de hipótesis y la argumentación cobren un papel protagonista en la producción de conocimiento, y que el profesor oriente las ideas del alumnado hacia las de la ciencia escolar. En particular:

El primer paso para diseñar una experiencia adecuada es identificar el problema a resolver (en este caso, determinar el calor asociado a un proceso dado).

Con relación al proceso termodinámico que tiene lugar en el sistema (el proceso de disolución del NaOH en agua), se establecen los estados inicial y final del sistema: el estado inicial es el sistema compuesto por la masa de NaOH sólido y el volumen de agua considerado, y el estado final es la disolución de NaOH en agua.

Identificado el problema, es necesario relacionarlo adecuadamente con las variables involucradas. En concreto, los alumnos han de reconocer la relación del calor puesto en juego en el proceso de disolución con las siguientes variables de las que depende: la cantidad de materia del sistema, la naturaleza de las sustancias que componen el sistema y la variación de temperatura que experimenta el sistema entre los estados inicial y final.

La actividad se ha estructurado de tal modo que, cuando los alumnos aborden el diseño experimental (cuestión B), ya hayan establecido una relación entre la variación de temperatura y la variación de entalpía del sistema (cuestión A).

Identificadas las variables implicadas en el problema, los alumnos han de decidir qué magnitud(es) serán objeto de medida experimental (la temperatura), y cuáles estarán controladas (las dos variables restantes). El volumen del sistema es una variable controlada, si se consideran despreciables las pérdidas de agua por evaporación. La presión se mantiene también en un valor constante y conocido: 1 atm (calorimetría a presión constante).

Llegados a este punto, la estrategia de recogida de datos experimentales es obvia: consistirá en el registro sistemático de los valores de temperatura inicial y final del sistema mediante el uso de un termómetro.

Se ayudará a los alumnos a adquirir conciencia de determinados aspectos del diseño experimental que pueden interferir o estorbar la precisión de las medidas experimentales. En particular, se pretende que los alumnos tomen decisiones sobre el uso adecuado del material de laboratorio y las sustancias que van a manipular:

Se debe introducir el termómetro en el seno de la disolución. Para minimizar el error cometido en las medidas de la temperatura, se tomará como temperatura inicial del

sistema la temperatura del volumen de agua una vez introducido en el calorímetro, y como temperatura final del sistema el valor más alto que indique la lectura del termómetro una vez disuelta toda la masa de hidróxido de sodio.

El recipiente que contenga el sistema debe ser adecuado para evitar que se produzcan *pérdidas* de energía al entorno por medio de transferencias no deseadas. Para asegurarse de que las pérdidas de energía son mínimas, se elegirá como recipiente un vaso Dewar, un vaso de precipitados envuelto en polietileno…

Dado que la cantidad de energía transferida depende de la cantidad de materia del sistema, han de adecuarse las cantidades de agua y NaOH para que el incremento de la temperatura del sistema sea de unos 5-6 ºC, a fin de minimizar el error cometido al despreciar las pérdidas de energía al entorno.

El tratamiento de los datos experimentales implicará relacionar la temperatura del sistema y el calor involucrado en el proceso, a través de la expresión:

$$q_p = \Delta H = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Esto es: $$q_p = \Delta H = (m_{\text{disolución}} \cdot c_{\text{agua}} + m_{\text{calorímetro}} \cdot c_{\text{vidrio}}) \cdot \Delta T$$

El valor de c para la disolución puede considerarse igual a c_{agua}, puesto que se trata de una disolución acuosa diluida. Si el calorímetro es de vidrio, el profesor puede facilitar a los alumnos el valor de c_{vidrio} como información bibliográfica para la resolución del problema. Se puede, de todos modos, introducir la idea del *equivalente en agua del calorímetro*, de gran utilidad si se pretende realizar determinaciones calorimétricas en calorímetros cuya composición exacta se desconoce.

Por otra parte, mediante esta actividad se pretende hacer reflexionar a los alumnos sobre la importancia de planificar las experiencias que se van a realizar. En la actividad científica no sólo es necesario conocer las técnicas experimentales y el material de laboratorio que se utilizarán, sino también la naturaleza y propiedades de las sustancias que se manipularán, las medidas de seguridad e higiene pertinentes para su manipulación, las cantidades de sustancia (masa, número de mol, volumen…) con las que se trabajará, y la información bibliográfica complementaria necesaria para la resolución del problema (en este caso, los valores de c_{agua} y c_{vidrio}, o el valor del equivalente en agua del calorímetro).

De la puesta en común y el debate de las propuestas que realicen los alumnos, bajo la supervisión del profesor, surgirán el diseño y la planificación de la experiencia calorimétrica que los alumnos llevarán a cabo en el laboratorio (Actividad *Fp08*). Será el docente quien decidirá en última instancia las cantidades de sustancia a emplear en la experiencia, y la distribución de los alumnos en grupos de trabajo, de acuerdo con las características del laboratorio disponible en el centro educativo.

Actividad Fp08: determinación del calor de disolución del NaOH $_{(s)}$

Con la actividad *Fp08* se pretende que los alumnos realicen en el laboratorio la experiencia calorimétrica cuyo diseño y planificación elaboraron en la actividad *Fp07*.

Esta experiencia calorimétrica se ha diseñado para que los alumnos la realicen en pequeños grupos, a fin de favorecer la comunicación tanto de los alumnos entre sí (*comunicación entre iguales*) como entre los alumnos y el profesor (*comunicación igual-experto*). De este modo, a través del intercambio de ideas, la argumentación en el aula adquiere una dimensión añadida a la de la expresión social y el establecimiento de los roles de grupo: se afirma como medio indispensable para la producción y la divulgación de conocimiento en un contexto social.

El objetivo de esta actividad es que los alumnos expliciten y desarrollen destrezas, estrategias y técnicas relacionadas con la realización, el análisis, la discusión y la comunicación de experiencias de laboratorio. A continuación, se describen diversas estrategias, técnicas y destrezas que los alumnos pondrán en juego mediante esta actividad, y que hacen referencia a diferentes acciones del trabajo científico:

Varias de las estrategias, técnicas y destrezas que los alumnos han de poner en juego a la hora de realizar la experiencia aparecen contempladas en el currículo oficial para la asignatura de Física y Química de 1º de Bachillerato (XUGA, 2008), y se refieren a acciones como la utilización de la balanza o del granatario para la pesada de sustancias sólidas, la medida de volúmenes de líquidos en material graduado (probeta o vaso de precipitados) o el uso del termómetro como instrumento de medida de la temperatura. Además, la realización de esta actividad requiere que los alumnos conozcan y utilicen un calorímetro, sea éste un vaso Dewar o un vaso de precipitados recubierto por material aislante (corcho, polietileno…). Se explicitará que la calidad de los resultados de la experiencia depende de que las paredes del calorímetro sean más o menos adiabáticas (calidad del aislante); pero también de la utilización del instrumental de laboratorio.

Con relación a la realización de la experiencia, el profesor enfatizará en la necesidad llevar a cabo toda acción experimental con pulcritud, transparencia comunicativa y rigor científico. Asimismo, antes de proceder a la manipulación de las sustancias químicas y del material e instrumental de laboratorio, se subrayará la importancia de adoptar las medidas de seguridad e higiene pertinentes. En todo caso, durante la realización de la experiencia, el docente se asegurará de que los alumnos manejan adecuada, meticulosa y prudentemente los recursos del laboratorio.

Un aspecto importante en la *praxis* experimental en Ciencias, pero que pocas veces se hace explícita en el laboratorio de Secundaria, es la gestión de los residuos producidos como consecuencia de la actividad experimental. En este caso, y dado que la disolución resultante de la experiencia será utilizada con posterioridad en la actividad *Fp09*, esta cuestión no se presentará todavía; sin embargo, el profesor puede preferir introducirla en esta actividad, si lo considera oportuno.

Tabla 20: Guion de la actividad Fp08 – determinación del calor de disolución del NaOH (s)

Actividad *Fp08*: determinación del calor de disolución del NaOH (s)

Ahora, en el laboratorio, vas a determinar el calor de disolución del NaOH (s) en agua. Supondremos que el equivalente en agua del calorímetro es de 42 g.

¡ATENCIÓN!: El hidróxido de sodio es una sustancia corrosiva. Lee atentamente las indicaciones de seguridad para su manipulación.

Nota: vas a trabajar con una sustancia higroscópica, esto es, que presenta tendencia a retener agua del ambiente. Por eso, procura realizar las medidas de masa razonablemente rápido.

Mide el volumen de agua que utilizarás en la experiencia. Introduce este volumen de agua en calorímetro. Anota su temperatura.

Sobre un vidrio de reloj, mide la masa de NaOH. Anótala.

Añade con cuidado al calorímetro la masa de NaOH que has medido. Agita la mezcla hasta que el hidróxido de sodio se disuelva totalmente. Lee en el termómetro cómo varía la temperatura de la disolución, y anota el valor máximo que alcance.

A. Calcula la variación de entalpía asociada al proceso que has realizado. ¿En qué unidades crees que es conveniente expresar el resultado? Justifica tu respuesta.

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer sobre la concordancia de tus resultados con los de tus compañeros?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

En cuanto a las incidencias ocurridas durante la realización de la experiencia, se incidirá en la necesidad de anotar cuidadosa y objetivamente todas las acciones que se emprendan, el material utilizado y las observaciones pertinentes. Por ejemplo, para el caso de la medida de la masa de NaOH, es conveniente que los alumnos anoten *in situ*, y no *a posteriori*, la masa exacta medida, y que observen si la superficie de las lentejas de sosa se aprecia brillante, empañada… Se ayudará a los alumnos a identificar la información relevante, y se insistirá en que el registro sistemático de este tipo de observaciones resulta fundamental en el trabajo científico, puesto que permite:

- profundizar en la comprensión de las acciones realizadas;
- describir el desarrollo completo de una experiencia, lo cual es de gran utilidad si se pretende comunicar o divulgar la investigación;
- analizar los posibles errores cometidos, y evitar cometerlos en futuras réplicas de la experiencia o en el diseño y la planificación de experiencias distintas.

A fin de que los alumnos adquieran conciencia de todos estos aspectos, se enfatizará en la idea que sus acciones tienen una repercusión directa sobre los resultados que de ellas obtengan. Para destacar esta idea, en diferentes momentos durante el

desarrollo de la actividad se relacionarán las observaciones de los alumnos con los resultados obtenidos y con los errores cometidos.

Con relación a los resultados experimentales obtenidos, se pretende que los alumnos expliciten y desarrollen estrategias, técnicas y destrezas relativas a:

- La obtención de los resultados: la variación de entalpía asociada al proceso de disolución del hidróxido de sodio en agua se determinará a partir de los datos experimentales (temperaturas inicial y final del sistema).
- El análisis y la comunicación de los resultados: se realizará mediante una puesta en común, en gran grupo, de los resultados obtenidos por los grupos de trabajo.

En caso de que todos los grupos hayan realizado la experiencia partiendo de la misma masa de NaOH, el profesor puede facilitar a los alumnos algunos datos de ΔH correspondientes a experiencias realizadas con diferentes masas de NaOH. Con ello, además de poner de manifiesto el carácter extensivo de la magnitud entalpía, se avanza un paso más allá: el alumnado comprobará la conveniencia de referir los datos de las magnitudes extensivas a la unidad de sustancia de interés, preferentemente al reactivo limitante (caso de haberlo). En este caso, las unidades recomendadas son kilocalorías o kilojulios por mol de NaOH disuelto (kcal/mol $NaOH_{(aq)}$ ó kJ/mol $NaOH_{(aq)}$).

El análisis y la discusión de los errores cometidos: se analizarán, primero en pequeño grupo y finalmente en gran grupo, las posibles causas de las discrepancias en los resultados experimentales. El profesor ha de especificar cuáles son las *fuentes de error* recurrentes en el laboratorio: la precisión de los aparatos de medida, defectos en la calibración del material y del aparataje de laboratorio, defectos debidos a las técnicas experimentales utilizadas, y sesgos debidos a imprecisiones del investigador.

En el caso de esta actividad, existen tres fuentes de error debido al propio planteamiento experimental: en primer lugar, se ha considerado que el calor específico de la disolución de NaOH es igual a la del agua; en segundo lugar, se han despreciado las pérdidas de masa del sistema debidas a la evaporación del agua; por último, se han despreciado también las pérdidas en energía al entorno por el proceso de calor. La primera y la segunda consideración apenas acarrearán error, siempre que la determinación calorimétrica se lleve a cabo en condiciones de temperatura ambiente. Sin embargo, la tercera aproximación sí puede conducir a errores significativos si el calorímetro no es lo suficientemente adiabático o si los alumnos no lo cierran bien.

La comparación de los datos de ΔH, una vez expresados en unidades de kcal/mol ó kJ/mol, podrá de manifiesto una significativa desviación de los resultados experimentales para las disoluciones con pequeñas cantidades de NaOH. Esta desviación tiene su origen en la estimación de ΔH a través de la medida de la temperatura alcanzada por la disolución, ignorando disipaciones de energía por el proceso calor. El error producido por esta aproximación resultará en general despreciable si se toman

precauciones experimentales para que la cantidad de energía cedida al entorno sea varios órdenes de magnitud menor que la cantidad de energía invertida en aumentar la temperatura de la disolución; de todos modos, para pequeñas cantidades de NaOH disuelto, la energía cedida por el proceso calor no será despreciable frente al calor que se manifiesta en la variación de temperatura experimentada por la disolución, y la estimación de ΔH en función de esta última transferencia de energía acarreará un considerable error. Por otra parte, si la cantidad de NaOH utilizada en la experiencia es pequeña, el ascenso en el valor de la temperatura será de pocos grados Celsius, con lo que un pequeño *error absoluto* en la lectura del termómetro significará un gran error relativo en la medida.

A fin de ajustar la temporalización de la unidad didáctica a un número no excesivo de sesiones, quizá sea conveniente que los alumnos no efectúen réplicas de la experiencia. En todo caso, se sugiere que sí realicen un estudio de errores a partir del promediado de los resultados de ΔH (en kJ/mol) obtenidos por los distintos grupos.

A través de este hecho experimental se insistirá en la necesidad de conocer y analizar las causas de error en la medida, tema que constituye uno de los aspectos fundamentales a la hora de analizar los resultados experimentales y emitir juicios de valor sobre la fiabilidad y las limitaciones de las investigaciones de laboratorio en Ciencias.

Actividad Fp09: determinación del calor asociado al proceso de neutralización entre HCl $_{(aq)}$ y NaOH $_{(aq)}$

En la actividad *Fp09* se pide a los alumnos que realicen en el laboratorio una experiencia calorimétrica similar a la que realizaron en la actividad *Fp08*. Mediante esta nueva experiencia, determinarán la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización entre un ácido fuerte y una base fuerte.

Nuevamente, esta experiencia calorimétrica se efectúa en pequeños grupos, a fin de favorecer la comunicación entre iguales (alumnos) y con el experto (profesor). Esta actividad involucrará la explicitación y el desarrollo de destrezas, estrategias y técnicas que los alumnos ya pusieron en juego durante la actividad anterior.

Cuando a los alumnos se les propuso realizar la experiencia calorimétrica de la actividad *Fp08*, ya conocían su diseño y su planificación, puesto que ellos mismos las habían diseñado mediante la actividad *Fp07*. En esta actividad *Fp09*, por el contrario, el planteamiento de la experiencia es exactamente el inverso: se trata de que, sobre la base de un guion de trabajo cuyo diseño se les presenta *in situ*, los alumnos planifiquen la experiencia. Con ello se pretende que, a lo largo de las actividades *Fp07*, *Fp08* y *Fp09*, el alumnado adquiera conciencia y práctica sobre las dos perspectivas de planificación experimental más usuales del laboratorio de Ciencias y, en particular, de Química: la planificación *ab initio* de experiencias, sin que el investigador disponga de diseños elaborados por otros investigadores, y la planificación de experiencias a partir de directrices ofrecidas por otros investigadores. Ante este último planteamiento,

nuevamente se pondrá de manifiesto la conveniencia de detallar las observaciones, los argumentos explicativos y las conclusiones de la actividad científica: las indicaciones detalladas del trabajo experimental ayudan a la comunidad científica a desarrollar nuevas investigaciones, nuevos métodos…

Tabla 21: Guion de la actividad Fp09 – determinación del calor asociado al proceso de neutralización entre HCl $_{(aq)}$ y NaOH $_{(aq)}$

Actividad *Fp09*: determinación del calor asociado al proceso de neutralización entre HCl $_{(aq)}$ y NaOH $_{(aq)}$

Ahora, en el laboratorio, determinarás la variación de entalpía asociada a una reacción de neutralización entre un ácido fuerte (ácido clorhídrico, HCl) y una base fuerte (hidróxido de sodio, NaOH). Trabajarás con disoluciones acuosas tanto de la base como del ácido.

La ecuación química que corresponde a este proceso de neutralización es:

$$NaOH_{(aq)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)}$$

¡ATENCIÓN!: aun diluido, el ácido clorhídrico es una sustancia corrosiva y altamente tóxica. Deben tomarse precauciones a la hora de su manejo y, en especial, es importante no inhalar los vapores que desprende. Lee atentamente las indicaciones de seguridad para su manipulación.

Anota el volumen y la concentración del NaOH a utilizar (ver Fp08). — *100 mL NaOH 0,1 M*

En un vaso de precipitados, mide el volumen de HCl a utilizar. Anótalo, junto con la concentración de la disolución de HCl. — *100 mL HCl 0,1 M*

Cuando la temperatura de la disolución de NaOH sea la misma que la de la disolución de HCl, añade la disolución básica sobre la ácida. Agita con la varilla de vidrio. Observa y anota los cambios que se producen en la mezcla.

Anota la temperatura máxima alcanzada por el sistema. ☐

A. Calcula la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización que has realizado. ¿A qué reactivo referenciarías las unidades de ΔH? Justifica tu respuesta.

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer sobre la concordancia de tus resultados con los de tus compañeros?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

La experiencia calorimétrica en la que se centra la actividad *Fp09* es, en muchos aspectos, análoga a la experiencia de la actividad *Fp08*:

La disolución de NaOH que utilizarán los alumnos en la experiencia será la que prepararon en la actividad *Fp08*.

De nuevo se trabaja con la técnica de calorimetría a presión constante.

Las estrategias de obtención y de registro sistemático de datos, así como el material de laboratorio a utilizar, son básicamente los mismos.

En cambio, la planificación de esta experiencia requiere:

Realizar cálculos encaminados a la preparación y manipulación de las disoluciones acuosas del ácido a partir de los datos de la disolución de la base.

Adoptar medidas de seguridad e higiene adicionales para la manipulación del $HCl_{(c)}$ y del $HCl_{(aq)}$. Dada la peligrosidad que suponen los vapores de cloruro de hidrógeno desprendidos por las disoluciones de ácido clorhídrico, el profesor puede considerar más seguro preparar y dispensar él mismo la disolución de $HCl_{(aq)}$ a partir del $HCl_{(c)}$.

En lo relativo a la gestión de los residuos, se recomienda explorar las ideas de los alumnos sobre el particular, con el objetivo de guiar sus ideas hacia un consenso aceptable desde el punto de vista de la conservación del medio ambiente. Una estrategia eficaz para minimizar la peligrosidad de las mezclas ácidas o básicas consiste en neutralizarlas y diluirlas a dilución infinita antes de eliminarlas; en este caso, dado que la disolución resultante de la experiencia es una mezcla de neutralización, para su eliminación bastará con diluirla.

Se realizará una puesta en común, en gran grupo, en la que se comuniquen y discutan los datos de ΔH calculados por los grupos de alumnos a partir de las medidas experimentales de temperatura. Además de desarrollar las ideas clave ya comentadas para la actividad *Fp08*, con esta puesta en común se pretende hacer surgir entre los alumnos la necesidad de elegir a qué reactivo referenciar los datos de ΔH asociados a una reacción química. Mediante este planteamiento se pretende que el alumno acepte la conveniencia de referenciar los datos termodinámicos de una reacción química al reactivo limitante de la misma, o bien a aquél reactivo cuya valoración interesa, o al que sea objeto de estudio (por ejemplo, aquél cuyas propiedades interesa caracterizar). En esta actividad, dado que se conoce la concentración de los reactivos y se supone que ambos se neutralizan exactamente, en principio no existiría un criterio específico para elegir el ácido o la base como reactivo de referencia. Sin embargo, resulta conveniente referenciar los datos de ΔH a los mol de hidróxido de sodio neutralizados, a fin de poder comparar la exotermia de la disolución de NaOH en agua con la exotermia de neutralización entre el $NaOH_{(aq)}$ y el $HCl_{(aq)}$.

El tratamiento de los datos de ΔH calculados, expresados en unidades de kcal/mol o kJ/mol, permitirá analizar los errores cometidos en las medidas. Esto capacitará a los alumnos para emitir juicios de valor sobre la fiabilidad de la experiencia.

A continuación, mediante la actividad *Fp10*, se pretende que los alumnos revisen y reestructuren las ideas que se han hecho explícitas a lo largo de las actividades *Fp07* – *Fp09*. Posteriormente, *Fp11* informa al alumnado sobre las leyes de la Termoquímica.

De acuerdo con las conclusiones de la literatura científica sobre las ideas alternativas de los alumnos, hemos considerado conveniente no introducir destrezas de cálculo hasta haber completado la construcción del concepto de ΔH y de los enunciados

termoquímicos que a él se refieren. Creemos, en la línea de Barlet y Mastrot (2000), Teichert y Stacy (2002) y Greenbowe y Meltzer (2003), que la comprensión conceptual debe preceder a la manipulación algebraica, y que una presentación pura o eminentemente algorítmica de los conceptos científicos puede representar un obstáculo adicional en la construcción de un conocimiento que resulte funcional para los alumnos y sea aceptado por ellos de forma racional y no dogmática. Por este motivo, en toda actividad se anima a los alumnos a abordar y resolver los problemas –cualitativos o cuantitativos– desde una perspectiva crítica, reflexiva y analítica.

Actividad Fp10: un poco de orden para ΔH

Como se ha comentado, esta actividad de reestructuración propone al alumnado repasar las ideas que se hicieron explícitas a lo largo de las actividades *Fp07* – *Fp10* acerca de las técnicas calorimétricas.

Tabla 22: Guion de la actividad Fp10 – un poco de orden para ΔH

Actividad *Fp10*: un poco de orden para Δ*H*

Suele definirse el "calor de reacción" como el calor implicado en la transformación completa de los reactivos a los correspondientes productos, siempre que reactivos y productos se hallen en las mismas condiciones de presión y temperatura.

Ya sabes que, para una reacción química que tenga lugar en un sistema cerrado (es decir, con m = cte), la cantidad de energía transferida con el entorno coincide con ΔU en los procesos a V = cte, y con ΔH en los procesos a p = cte. Como U y H son funciones de estado, no importa que p y V varíen durante la reacción, siempre y cuando reactivos y productos se hallen en las mismas condiciones de p y T.

Ya has comprobado que las técnicas de calorimetría son muy útiles para conocer los valores del "calor de reacción" (así se suele conocer a ΔU ó ΔH) en condiciones de V ó p controladas. Las técnicas calorimétricas se basan en que la cantidad de energía absorbida o desprendida por calor durante el proceso químico se transfiere tanto a los propios recipientes que las contienen, como a las sustancias que intervienen en el proceso, las cuales experimentan una variación en su temperatura, ΔT, que podemos medir. Pero sólo se puede determinar por calorimetría el "calor de reacción" de unas pocas reacciones, porque los resultados de la técnica calorimétrica solamente resultan fiables en caso de que la reacción sea rápida, completa y sin reacciones secundarias, que distorsionarían los resultados.

Cuando en las reacciones estudiadas no intervienen gases, las mediciones calorimétricas se pueden realizar en recipientes abiertos, esto es, en calorímetros a presión constante.

En las reacciones en las que intervienen gases (como, por ejemplo, las combustiones), determinar ΔH mediante calorimetría a presión constante conllevaría grandes errores, porque se estaría despreciando el trabajo que realizan los gases contra la atmósfera. Para evitar este error, el equipo experimental que se utiliza es la bomba calorimétrica, recipiente de acero donde se encierra la muestra (V = cte) en atmósfera de O_2 antes de proceder a su combustión. Con un termómetro se puede conocer ΔT durante la combustión. A partir

de ΔT, se calcula el valor de q_V (que coincide con ΔU), y, a partir de éste, ΔH.

En Termoquímica, la información relacionada con el "calor de reacción" suele expresarse como ΔH y no ΔU, porque ΔH tiene en cuenta el trabajo $p \cdot V$. Por ejemplo, los datos de muchas reacciones se recogen en tablas de datos termodinámicos, en las cuales se indican:

- el valor de ΔH medido en kJ/mol (SI), y
- las condiciones de T y p a las que se realizó la experiencia calorimétrica. En casi todas las tablas disponibles, T = 298 K y p = 1 atm.

Es muy útil anexar la información termoquímica a las reacciones químicas. Así se forman las ecuaciones termoquímicas, en las que se indican los reactivos y productos en sus estados de agregación, las condiciones de p y T de reacción, y el valor de ΔH por mol de reactivo. Por ejemplo:

$$Fe_2O_{3\,(s)} + 3\ H_{2\,(g)} \rightarrow 2\ Fe_{\,(s)} + 3\ H_2O_{\,(l)} \qquad H^0_{r,298} = -33{,}3\ kJ$$

Esta ecuación termoquímica indica que cuando 1 mol de Fe_2O_3 sólido reacciona con 3 mol de H_2 gaseoso, para formar 2 mol de Fe sólido y 3 mol de H_2O líquida, se transfieren al entorno 33,3 kJ de energía. La reacción es exotérmica ($\Delta H < 0$).

El subíndice de ΔH_r (ΔH de la reacción) indica la temperatura en Kelvin; cuando ésta es de 298 K, el subíndice de ΔH_r suele omitirse. El superíndice ^{0} de ΔH_r indica que el dato de ΔH ha sido referido a la presión de 1 bar, siendo 1 bar = 105 Pa. Es decir, 1 bar ~ 1 atm. A H^0_r se la conoce como la variación de entalpía normal de reacción, definida como la ΔH_r de una reacción en la que todos y cada uno de los reactivos y productos se hallan en sus estados normales (es decir, en el estado más estable a p normal y a la T que se considere).

Se pretende destacar mediante esta actividad la utilidad de ΔH como criterio para conocer las transferencias de energía que acompañan a los procesos químicos. Asimismo, se ofrece información a los estudiantes sobre la posibilidad de organizar los datos experimentales de ΔH en tablas termodinámicas, y de anexar los datos a las ecuaciones químicas para formar ecuaciones termoquímicas.

Al desarrollar estas ideas se persigue un doble objetivo:

Por un lado, es necesario que los alumnos sean conscientes de una identificación que, por lo general, permanece implícita a lo largo del desarrollo de las actividades de aula: para poder aplicar al estudio de un proceso químico los datos tabulados de ΔH, ha de elegirse como sistema termodinámico el sistema reaccionante.

En segundo lugar, se busca que los alumnos valoren la Ciencia como medio útil de producción de conocimiento. La necesidad de predecir cómo serán las transferencias de energía entre el sistema químico y su entorno lleva a elegir una función de estado del sistema (ΔH) cuya variación nos facilite esta información de forma cualitativa y cuantitativa; cuantos más datos de la función de estado ΔH se logren sistematizar, coleccionar y ordenar, mayor será el número de procesos químicos que se podrán estudiar mediante la simple consulta de una tabla termodinámica, y sin tener que recurrir a las técnicas calorimétricas.

Además, en este momento comienza a cobrar sentido la simbología convencional recomendada para ΔH, que se completará en la actividad de reestructuración *Fp11*.

Actividad Fp11: las leyes de la Termoquímica

En esta actividad se informa al alumnado sobre las leyes de la Termoquímica, enunciadas por Lavoisier, Laplace y Hess antes del primer principio.

Con esta actividad se pretende que la introducción de las leyes de la Termoquímica se fundamente en la naturaleza de ΔH como función de estado del sistema. De aquí se deriva directamente la consecuencia más importante de las Leyes: la posibilidad de aplicar un tratamiento algebraico a las ecuaciones termoquímicas. Éstas pueden ser sumadas, restadas, multiplicadas por constantes y ordenadas en secuencias lineales o cíclicas para calcular la ΔH_r de una reacción de interés a partir de las ΔH de reacciones relacionadas.

Tabla 23: Guion de la actividad Fp11 – las leyes de la Termoquímica

Actividad *Fp11*: las leyes de la Termoquímica

La Termoquímica se basa en dos leyes empíricas, que, aunque fueron enunciadas con anterioridad al primer principio de la Termodinámica, en realidad son una aplicación directa del mismo:

La ley de Lavoisier-Laplace establece que el cambio térmico, a p o V constante, que acompaña a una reacción química en una dirección dada, es igual, pero de signo contrario, al cambio térmico asociado al proceso químico inverso. Si no fuese así, no se cumpliría el primer principio de la Termodinámica.

La ley de Hess dice que el calor de reacción, a p ó V constante, de una reacción química dada es el mismo tanto si ésta se verifica en una sola etapa, como si tiene lugar en varias. Esta ley deriva de las propiedades de las funciones de estado (en concreto, de U y H), cuyas variaciones dependen únicamente de los estados inicial y final, y no del camino termodinámico.

Las leyes de la Termoquímica, en resumen, nos indican que:

Por ser H función de estado, la variación de entalpía de cualquier reacción, ΔH_r, puede calcularse como combinación de las ΔH de cualquier secuencia de reacciones, siempre que tengan lugar en las mismas condiciones de p y T para los estados inicial y final.

Así pues, las ecuaciones termoquímicas pueden tratarse de modo algebraico (se pueden sumar, restar…) De este modo podemos establecer secuencias y ciclos de ecuaciones termoquímicas para calcular variaciones de entalpías de reacción (ΔH_r) que no figuren en las tablas de datos termodinámicos.

Es fácil entender que las tablas de datos termodinámicos brindan una ayuda indiscutible a la hora de calcular la ΔH_r de cualquier reacción que nos interese. Las tablas de datos termodinámicos recogen, entre otros datos, valores de variaciones de entalpía para combustiones (ΔH_c) y reacciones de formación de compuestos a partir de sus elementos constituyentes (ΔH_f). Las reacciones de formación son muy útiles, gracias a que la comunidad científica ha adoptado un convenio que asigna $H = 0$ a los elementos en forma pura, a temperatura de 25 °C y en condiciones normales de presión ($p^0 = 1$ bar).

En la mayor parte de las tablas termodinámicas, los valores de ΔH_c y/o ΔH_f

en kJ/mol (SI) vienen referidos a la temperatura T = 298 K y a la presión atmosférica p = 1 atm. Dado que la presión atmosférica se aproxima mucho a la presión normal p^0, podemos considerar despreciable el error que cometeremos al utilizar estas tablas.

En resumen: las tablas termodinámicas incluyen datos de:

ΔHc (variación de entalpía de combustión): se define como la variación de entalpía que se produce al transformarse los reactivos puros y separados en los correspondientes productos de combustión, puros y separados, teniendo en cuenta la ecuación química ajustada.

ΔHf (variación de entalpía de formación): se define como la variación de entalpía en la reacción de formación de 1 mol de sustancia a partir de sus elementos constituyentes, puros y separados, a p constante.

Como las experiencias calorimétricas suelen realizarse a presión atmosférica (próxima a la presión estándar), se considera que estos datos pueden tratarse como H^0_c y H^0_f.

Según las leyes de la Termoquímica, y con ayuda de las tablas de datos termodinámicos, podremos calcular la variación de entalpía ΔH_r asociada a cualquier reacción.

Por lo general interesan las variaciones de entalpía normales de reacción, H^0_r, esto es, la ΔH_r de una reacción en la que todos y cada uno de los reactivos y productos se hallan en sus estados normales.

Un resultado muy útil de las leyes de la Termoquímica es el siguiente:

En una reacción química, la variación de entalpía normal H^0_r viene dada por:

$$H^0_r = \Sigma[H^0_f \text{ (productos)}] - \Sigma[H^0_f \text{ (reactivos)}]$$

donde H^0_f es la entalpía normal de formación de la sustancia considerada, es decir, la ΔH_f cuando la sustancia se encuentra en su estado normal.

Se incidirá en la importancia del convenio mediante el que se ha asignado el valor H = 0 para los elementos puros a 25 ºC y 1 bar; gracias a este convenio, se ha establecido una escala relativa de entalpías y se ha logrado que los datos de ΔH_f ofrezcan directamente el valor de la entalpía del producto formado en las condiciones calorimétricas especificadas en la tabla.

Se explicitará la conveniencia de disponer de tablas termodinámicas que recojan valores de ΔH_c y ΔH_f, para facilitar el cálculo de cualquier ΔH_r de interés.

Al final de la actividad, se recomienda anexar a esta actividad *Fp11* una tabla de datos termodinámicos que los alumnos utilizarán como material de referencia bibliográfica para la realización de las actividades posteriores.

Llegados a este punto de la intervención, con las actividades *Fp12 – Fp15* se pretende que los alumnos, bajo supervisión del profesor, transfieran sus conocimientos de Termoquímica a la explicación, interpretación y predicción de los aspectos energéticos de diversos procesos químicos concretos. A lo largo de todas estas actividades, se planteará a los estudiantes la necesidad de abordar los problemas de manera crítica y analítica, no meramente algebraica. En este sentido, la investigación educativa ha puesto de manifiesto

que, en concreto, los problemas numéricos relacionados con la ley de Hess parecen constituir uno de los bastiones donde el tratamiento algorítmico desplaza o eclipsa por completo la comprensión conceptual (ver, por ejemplo: Barlet y Mastrot, 2000). A este respecto se recomienda al docente tener muy presente que, ante todo, se pretende fomentar la construcción de un conocimiento reflexivo y funcional; un conocimiento que capacite al alumnado para resolver de modo racional los problemas abiertos que se le presenten en su vida cotidiana, y extraer de los resultados una serie de inferencias y relaciones mediante las que pueda emitir conclusiones científicamente fundamentadas.

Al final de esta etapa de superación de dificultades de aprendizaje, mediante la actividad *Fp13* se planteará a los alumnos la posibilidad de representar gráficamente las variaciones de entalpía en diagramas entálpicos.

Finalmente, las actividades *Fp14* y *Fp15* abordan problemas abiertos cuya resolución demanda que los alumnos integren adecuadamente los tres dominios de conocimiento (macroscópico, microscópico y simbólico) de la Química.

Actividad Fp12: ... y sin necesidad de recurrir al laboratorio

Se trata de una actividad de aplicación de las leyes de la Termoquímica, en la cual se propone a los alumnos que determinen la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización entre hidróxido de sodio sólido y una disolución acuosa de HCl.

Tabla 24: Guion de la actividad Fp12 – … y sin necesidad de recurrir al laboratorio

Actividad *Fp12*: … y sin necesidad de recurrir al laboratorio

En la actividad *Fp08*, determinaste el calor de disolución, a presión constante, para el proceso de disolución del hidróxido de sodio en agua:

$$NaOH_{(s)} \rightarrow Na^{+}_{(aq)} + OH^{-}_{(aq)} \qquad \Delta H_1$$

En la actividad *Fp09*, determinaste el calor de neutralización, a presión constante, para la reacción siguiente:

$$NaOH_{(aq)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)} \qquad \Delta H_2$$

A. ¿Cómo calcularías, sin ayudarte de ninguna experiencia de laboratorio, el calor de neutralización correspondiente al proceso que se indica en la siguiente ecuación?

$$NaOH_{(s)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)} \qquad \Delta H_3$$

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer de tus cálculos?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Con esta actividad, se pretende que los alumnos apliquen la ley de Hess a un caso concreto. El objetivo es que los alumnos comprueben la gran funcionalidad del conocimiento científico: aplicando los constructos teóricos y procedimentales de la ciencia se pueden contrastar o generar nuevos conocimientos a partir del conocimiento existente.

Los alumnos han de adquirir conciencia de que, para poder aplicar la ley de Hess a los datos que han obtenido de las experiencias calorimétricas realizadas, deben partir de las siguientes premisas:

El sistema objeto de estudio es el sistema reaccionante, que en su estado inicial está constituido por dos fases: una fase sólida compuesta por hidróxido de sodio, y una fase líquida compuesta por la disolución acuosa de ácido clorhídrico. Dado que la neutralización se produce entre cantidades equimolares de un ácido fuerte y una base fuerte, puede suponerse que la reacción es cuantitativa (neutralización total). Como consecuencia, el sistema será monofásico en el estado final, y estará compuesto por los productos de la neutralización: la disolución de cloruro de sodio.

En el planteamiento de la actividad no se especifican las condiciones de temperatura a las que sucede la reacción; se supondrá que la temperatura inicial del sistema es la temperatura ambiente.

Se asumirá que el proceso termodinámico objeto de estudio (la reacción de neutralización) tiene lugar a presión constante. Dado que en esta reacción no se implican sustancias en fase gaseosa, y como la temperatura de reacción se supone cercana en todo momento a la temperatura ambiente, en realidad esta reacción podría llevarse a cabo en una bomba calorimétrica (a V = cte) sin que los resultados variasen apreciablemente, puesto que el trabajo de expansión del sistema puede considerarse nulo.

El cálculo de la ΔH asociada al proceso propuesto en esta actividad (ΔH_3) resulta inmediato al aplicar la ley de Hess a los resultados de las determinaciones calorimétricas que los alumnos han realizado en las actividades *Fi08* y *Fi09* (ΔH_1 y ΔH_2, respectivamente):

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

Puesto que la entalpía es función de estado, la variación de entalpía correspondiente a la reacción de neutralización entre un mol de hidróxido de sodio sólido y un mol de ácido clorhídrico diluido, ΔH_3, es la misma que la que se obtiene al disolver un mol de hidróxido de sodio en agua (ΔH_1) y neutralizar esta disolución con un mol de ácido clorhídrico diluido (ΔH_2). Ha de tenerse en cuenta que esta relación sólo es válida si los grados de dilución de todas las disoluciones implicadas son comparables, puesto que el grado de dilución influye en los procesos de transferencia de energía que se producen en el seno de las disoluciones.

Mediante la aplicación de las leyes de la Termoquímica se determina, sin necesidad de recurrir a nuevas experiencias calorimétricas, la variación de entalpía de muchas reacciones de interés. Disponer de colecciones de información termodinámica sistematizada y ordenada puede ser de especial interés en caso de que la reacción que se pretenda estudiar no suceda en las condiciones que exigen las técnicas calorimétricas.

La actividad *Fp12* finaliza con una reflexión, en gran grupo, sobre los resultados obtenidos. Con ello, más que analizar el tratamiento *cuantitativo* de los datos, lo que se

pretende es dotar de significado a los resultados numéricos y a las relaciones algebraicas implicadas en los problemas científicos:

Se recomienda relacionar la exotermia de estas reacciones con la variación de temperatura que los alumnos han registrado para los sistemas analizados.

En este caso, el signo negativo de los valores de ΔH_1 y ΔH_2 da una idea de la exotermia de ambos procesos, o lo que es lo mismo, informa de que existe una transferencia *neta* de energía desde el sistema hacia el entorno. La magnitud de ambos procesos indica que el proceso 2 es más exotérmico que el proceso 1 (la transferencia neta de energía al entorno es mayor). El proceso 3 puede ser considerado como un proceso que consta de dos etapas, cada una de las cuales se corresponden con los procesos 1 y 2, por este orden. La gran exotermia del proceso 3 se explica como el resultado del balance global de dos transferencias energéticas *netas* simultáneas.

Si los alumnos conocen el mecanismo de la solvatación de las sales iónicas en agua y están familiarizados con el concepto de neutralización, es posible que el profesor decida introducir los modelos corpuscular y de enlace en este momento de la intervención, a fin de relacionar la exotermia de estos procesos con la estructura de la materia y con la ruptura y la formación de interacciones entre las partículas que forman los sistemas materiales. La secuencia de actividades, en principio, se ha diseñado de tal modo que la introducción de la perspectiva microscópica se aborde en una actividad que presente una reacción más conocida para los alumnos; en particular, en la actividad *Fp14*, estructurada en torno a las reacciones de combustión de varios productos orgánicos sencillos. Sin embargo, dejamos a juicio del docente la decisión de adelantar esta relación de los modelos macroscópicos y microscópicos de la Química.

Actividad Fp13: dos productos de la combustión del carbón

Mediante esta actividad de aplicación se pretende que los alumnos transfieran sus conocimientos al cálculo, la representación y la interpretación de las variaciones de entalpía asociadas a tres reacciones relacionadas: las combustiones completa e incompleta del carbono, y la oxidación del monóxido de carbono a dióxido de carbono.

Para realizar el análisis termoquímico de estos procesos de combustión, los estudiantes han de hacer útiles las leyes de la Termoquímica, y poner en juego estrategias relacionadas con la manipulación y la representación gráfica de variables.

Las premisas para poder aplicar los datos termodinámicos tabulados a la resolución de los cálculos, son análogas a las que se han detallado en la descripción de la actividad anterior:

El sistema objeto de estudio es el sistema reaccionante, bifásico en su estado inicial. Si se supone que la reacción de combustión es cuantitativa (combustión total del carbono), en el estado final el sistema estará compuesto solamente por los productos de la reacción, y será monofásico.

Se asumirá que el proceso termodinámico objeto de estudio tiene lugar a presión constante (por ejemplo, en horno abierto, o en horno cerrado a presión controlada a un valor próximo al de la presión atmosférica). Dado que en esta reacción se implican sustancias en fase gaseosa, entre las transferencias de energía sistema-entorno no puede dejar de considerarse la contribución del trabajo de expansión que realizan los gases contra el entorno.

Tabla 25: Guion de la actividad Fp13 – dos productos de la combustión del carbón

Actividad *Fp13*: dos productos de la combustión del carbón

Dos productos de la combustión del carbón (C) son el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2). El CO_2 se forma cuando la combustión se realiza en presencia de un exceso de O_2; sin embargo, si las cantidades de O_2 son limitadas (combustión en defecto de O_2), de la combustión se generan CO y CO_2.

Apenas existen casos de envenenamiento por CO_2, dado que se trata de un gas cuyo único efecto nocivo es la asfixia por desplazamiento de oxígeno. Para evitarla, la mejor solución es la ventilación.

El CO, por el contrario, es un gas muy venenoso, y especialmente peligroso por lo difícil que resulta de detectar (es incoloro e inodoro). La toxicidad de este gas se debe a su afinidad de enlace al ión ferroso (Fe^{2+}) responsable de la captación de oxígeno en la hemoglobina. La unión de una sola molécula de CO al ión Fe^{2+} de la hemoglobina impide la captación de O_2. Como esta afinidad de enlace al transportador de oxígeno en sangre es unas 200 veces mayor que la afinidad de captación de O_2, una pequeña concentración de CO basta para incapacitar muchas moléculas de hemoglobina. Se considera que el riesgo de muerte por asfixia es elevado cuando aproximadamente la mitad de la hemoglobina en sangre se halla bloqueada por CO.

En caso de envenenamiento por CO, se debe trasladar de inmediato al intoxicado a una zona con abundante oxígeno. Las principales fuentes de CO en interiores son las estufas de gas y de leña, el humo del tabaco y, en los garajes, los gases emitidos por los tubos de escape de los automóviles.

A. A partir de los datos de ΔH_f para el CO y el CO_2, calcula la ΔH_c por mol de oxígeno para las reacciones de combustión del carbón, descritas por las siguientes ecuaciones:

$$C_{(s)} + \tfrac{1}{2} O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{(g)}$$

$$C_{(s)} + O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{2\ (g)}$$

B. ¿Cuál es la variación de entalpía correspondiente a la reacción representada por la siguiente ecuación?

$$CO_{(s)} + \tfrac{1}{2} O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{2\ (g)}$$

C. Elabora un diagrama de entalpías para poder comparar fácilmente los valores de ΔH_c de estas tres reacciones. A la vista del diagrama entálpico, ¿qué conclusiones puedes extraer sobre estas reacciones? Justifica tu respuesta.

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Aunque la actividad no especifica las condiciones de temperatura de reacción, casi todas las reacciones de combustión suelen suceder a altas temperaturas, para las cuales no

es usual disponer de datos tabulados (casi todas las tablas termodinámicas contienen datos tomados a 20 ºC ó 25 ºC). Se aprovechará esta circunstancia para plantear si los valores de ΔH de las tablas termodinámicas convencionales son adecuados cuando se quiere predecir con fiabilidad las transferencias energéticas implicadas en procesos químicos que suceden a altas temperaturas. Con ello se pretende que el alumnado identifique la siguiente pregunta, inicialmente implícita: ¿varían con la temperatura las transferencias energéticas que un sistema reaccionante establece con su entorno?

Para responder, los estudiantes harán uso de conocimientos relacionados con la estructura corpuscular de la materia. En particular, han de relacionar las transferencias energéticas implicadas en las reacciones químicas con las rupturas y formaciones de enlaces (o, en general, interacciones) entre las partículas del sistema. Dado que los enlaces y las interacciones entre partículas no varían de forma significativa en un amplio rango de temperaturas (siempre y cuando la sustancia no sufra cambios de fase o degradaciones químicas), puede considerarse que las transferencias energéticas permanecen constantes en un intervalo de temperaturas que puede alcanzar los varios cientos de Kelvin. La conclusión inmediata es que, a la hora de realizar los cálculos, puede considerarse una aproximación aceptable utilizar los datos tabulados de ΔH para predecir los aspectos energéticos de reacciones que suceden a temperaturas alejadas de la ambiente.

No es objetivo de esta actividad el que los alumnos lleguen a identificar las rupturas de enlaces químicos como procesos endotérmicos, y las formaciones de enlaces químicos como procesos exotérmicos; bastará con promover una relación sencilla entre un concepto macroscópico (las transferencias de energía implicadas en las reacciones) y un concepto microscópico (las interacciones entre las partículas del sistema). Los fenómenos constatados a nivel macroscópico, termodinámico, encuentran de este modo una justificación teórica en los modelos microscópicos de enlace y estructura de la materia: las transferencias de energía implicadas en las reacciones se deben a que, durante la reacción, cambian las interacciones entre las partículas del sistema (esto es, la distribución energética microscópica del sistema).

Los principales objetivos de esta actividad son:

En primer lugar, se pretende que el alumnado tenga presente el convenio que establece el valor de entalpía cero ($H = 0$) para los elementos puros en condiciones de p estándar. Se insistirá en la idea de que la Termodinámica no permite conocer valores absolutos de entalpía, sino solamente variaciones de la misma. La utilidad de recoger datos de ΔH_f en las tablas termodinámicas se hace evidente: de acuerdo del convenio descrito, las ΔH_f permiten conocer "valores reales de entalpía" de sustancias químicas.

Los estudiantes han de relacionar los valores de ΔH, recogidos en las tablas, con la dinámica de las reacciones a las que tales datos hacen referencia. Para ello calcularán las variaciones de entalpía –por mol de oxígeno– correspondientes a las reacciones de combustión completa e incompleta del carbón.

El primer paso para esta identificación es establecer las ecuaciones correspondientes a las reacciones de combustión completa e incompleta del C (s):

$$C_{(s)} + \tfrac{1}{2}\, O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{(g)} \qquad \Delta H_{c_1} = -110{,}5 \text{ kJ/mol C}_{(s)}$$

$$C_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)} \qquad \Delta H_{c_2} = -393{,}5 \text{ kJ/mol C}_{(s)}$$

Tres ideas importantes se pretenden introducir mediante este cálculo:

Se busca que los alumnos reflexionen *más allá del dato inmediato* cuando consulten las tablas termodinámicas. En este caso, las reacciones de combustión del carbono *coinciden con* las reacciones de formación de los correspondiente óxidos de carbono a partir de sus elementos: ΔH_f [*producto* $_{(g)}$] = ΔH_c [C $_{(s)}$].

$$C_{(s)} + \tfrac{1}{2}\, O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{(g)}$$

$$\Delta H_f \left[CO_{(g)}\right] = -110{,}5 \text{ kJ/mol CO} \equiv \Delta H_{c_1} = -110{,}5 \text{ kJ/mol C}$$

$$C_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)}$$

$$\Delta H_f \left[CO_{2(g)}\right] = -393{,}5 \text{ kJ/mol CO}_2 \equiv \Delta H_{c_2} = -393{,}5 \text{ kJ/mol C}$$

El cálculo es trivial; lo que se pretende es hacer explícita la relación entre las tres reacciones. Se enfatizará en que las reacciones son procesos químicos acompañados de transferencias energéticas, cuyo valor cuantitativo se refleja en las tablas termodinámicas.

Al pedir a los alumnos que calculen, para estas reacciones, la variación de entalpía por mol de oxígeno, se pretende poner de manifiesto el carácter extensivo de la magnitud ΔH: la cantidad de energía transferida entre el sistema y su entorno varía según la cantidad de materia del sistema, puesto que depende del número de interacciones que se rompan y del número de interacciones que se establezcan. Ha de insistirse en la adecuada utilización de la simbología matemática, así como en la necesidad de expresar los resultados de modo claro, conciso y conforme a las convenciones recomendadas.

$$2\, C_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow 2\, CO_{(g)} \qquad \Delta H_{c_1} = -221{,}0 \text{ kJ/mol O}_{2\,(g)}$$

$$C_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)} \qquad \Delta H_{c_2} = -393{,}5 \text{ kJ/mol O}_{2\,(g)}$$

A continuación, los alumnos han de poner en juego las leyes de la Termoquímica para conocer, a partir de los valores de ΔH_c calculados, la variación de entalpía correspondiente la reacción de oxidación del CO a CO_2:

$$CO_{(g)} + \tfrac{1}{2}\, O_{2\,(g)} \rightarrow CO_2\,(g) \qquad \Delta H_{c_3}$$

Para ello utilizarán los datos de ΔH correspondientes a las reacciones de formación de los óxidos de carbono a partir de sus elementos constituyentes. La relación entre estas reacciones y la reacción de oxidación del CO a $CO_{2\,es}$ inmediata:

$$\Delta H_{c_3} = \Delta H_{c_2} - \Delta H_{c_1} = -393{,}5 \text{ kJ/mol C} - (-110{,}5 \text{ kJ/mol C}) = -283{,}0 \text{ kJ/mol CO}$$

Conocidos los valores de ΔH de las tres reacciones, se invitará al alumnado a elaborar un diagrama entálpico donde se vean reflejadas las tres variaciones entálpicas objeto de análisis. Se ha diseñado la actividad de modo que los estudiantes se enfrenten a la posibilidad de representar gráficamente, como crean conveniente, las variaciones de entalpía correspondientes a tres procesos relacionados. Al elaborar el diagrama, los alumnos pondrán en juego estrategias y destrezas relacionadas con la representación gráfica de variables termodinámicas:

En primer lugar, han de identificar la variable dependiente y la variable independiente. Probablemente no les suponga una gran dificultad identificar la entalpía como la variable dependiente; quizá no resulte tan evidente para ellos, sin embargo, que la variable frente a la cual se pretende describir la variación de la entalpía es el estado del sistema.

Es posible que los alumnos tengan pocas dificultades para establecer la escala de entalpías. Generalmente, en los diagramas entálpicos se presenta la entalpía sobre un eje vertical, tal que los valores se muestran en orden creciente hacia arriba, y en orden decreciente hacia abajo. La representación del valor referencial (el *cero de entalpías*) puede ayudarles a adecuar la longitud de las divisiones de la escala al rango de valores que van a representar.

La principal dificultad a la que se enfrentarán a la hora de elaborar el diagrama está en representar el estado del sistema. Por lo general, las gráficas que realiza el alumnado en el aula de ciencias se limitan a representaciones en un plano cartesiano, con la variable dependiente en el eje de ordenadas y la independiente en el eje de abscisas; sobre ambos ejes se sitúan casi exclusivamente variables *cuantificadas* por valores numéricos. Sin embargo, representar la entalpía en un diagrama bidimensional de este tipo sólo es posible en el ámbito de la Termodinámica de los procesos reversibles; fuera de este ámbito, el sistema no se encuentra en equilibrio a lo largo del proceso termodinámico, y por ello sus variables de estado no adoptan valores definidos en los sucesivos estados intermedios.

Pero la complejidad de estas disquisiciones teóricas excede en mucho los objetivos considerados por los diseñadores del currículo para los cursos de Bachillerato. Para introducir la imposibilidad de representar la entalpía mediante una línea de trazo continuo entre los puntos que representen los estados inicial y final del sistema, desde la presente propuesta didáctica se considera conveniente explicitar la siguiente idea: dado que la Termodinámica (clásica) no permite determinar más valores de H que el inicial y el final, los diagramas entálpicos no pueden representarse como diagramas bidimensionales en los que se describan los estados intermedios del sistema. Así, estos diagramas muestran solamente un eje vertical (el eje de entalpías), a la derecha del cual se representan, en forma de líneas horizontales, los estados inicial y final del sistema. El profesor puede considerar útil dibujar un "eje de estados" horizontal, en el que rotular los

estados inicial y final; en todo caso, se enfatizará que sobre este eje no se representan valores cuantificables mediante valores numéricos.

En el diagrama se representará gráficamente la variación de entalpía que se produce como consecuencia de la evolución del sistema termodinámico. El estado inicial y el estado final se dibujarán como líneas horizontales de trazo continuo, cuyo valor sobre el eje de entalpía será, respectivamente, el valor sumatorio de los valores de entalpía de los reactivos, y el valor sumatorio de los valores de los valores de entalpía de los productos. Existen muy diversas posibilidades gráficas para rotular los estados inicial y final:

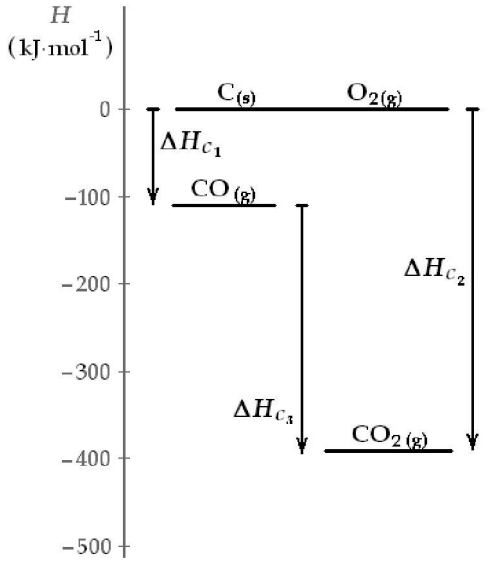


Figura 11: diagrama entálpico de la actividad Fp13

Recomendamos que la diferenciación entre los estados iniciales y finales de los sistemas venga indicada por la direccionalidad de las flechas con las que se indica la magnitud de las correspondientes variaciones de entalpía. La evolución del sistema desde un estado hasta otro vendrá indicado por una flecha cuya direccionalidad indica la *trayectoria del cambio*, entendida ésta como el sentido del camino termodinámico; de este modo, los alumnos pueden visualizar mejor qué valor de entalpía se atribuye a cada uno de los estados del sistema, independientemente de que un estado concreto represente la *situación inicial* en la que se encontraba el sistema, o la *situación final* hasta la que el sistema ha evolucionado.

Una vez elaborado el diagrama entálpico, se pedirá a los alumnos que interpreten, desde el punto de vista macroscópico que ya han trabajado en actividades anteriores, los aspectos energéticos de estas tres reacciones químicas. Para ello, partirán de la comparación de sus correspondientes valores de ΔH.

En el diagrama entálpico se visualiza que todas estas reacciones de combustión son exotérmicas (la entalpía del estado final es menor que la del estado inicial); en los tres casos, el signo negativo de la variación de entalpía de la reacción indica que existe una transferencia *neta* de energía desde el sistema hacia el entorno.

Se enfatizará en la idea de que el diagrama entálpico representa gráficamente la variación que experimenta la entalpía del sistema durante la reacción química, sin aportar información sobre el cambio químico en sí. La simbolización de un *estado inicial* y un *estado final del sistema* en el diagrama puede compararse con la expresada en las ecuaciones químicas, en el sentido de que ambas muestran de forma simplificada la composición del sistema antes y después del cambio químico; sin embargo, ni los diagramas entálpicos ni las ecuaciones químicas describen la reacción química como interacción dinámica entre las partículas constituyentes del sistema.

Si los alumnos conocen los aspectos de enlace y estructura de las cuatro sustancias químicas implicadas en estas tres reacciones (carbono, oxígeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono), esta actividad podría servir para incorporar relaciones de la perspectiva microscópica en el marco teórico macroscópico que los alumnos construyen en el aula. No obstante, dadas las particularidades de enlace del grafito y del CO –quizá poco conocidas para los alumnos–, se recomienda centrar esta actividad en la superación de dificultades sobre la elaboración de diagramas entálpicos y sobre la aplicación de la ley de Hess.

Nuevamente, queda a juicio del docente la decisión de adelantar esta relación de los modelos macroscópicos y microscópicos de la Química.

Una posibilidad interesante para introducir la perspectiva microscópica en este momento de la intervención en el aula sería la siguiente:

Elaborado e interpretado el diagrama desde el punto de vista termodinámico (macroscópico), el alumnado dispone de una visión esquemática de la relación que mantienen estas cuatro sustancias químicas en las tres reacciones planteadas. Como el diagrama entálpico permite visualizar fácilmente la magnitud relativa de los valores de las ΔH propuestas, puede proponerse a los alumnos que establezcan y justifiquen las similitudes y las diferencias que encuentren entre los valores representados en el diagrama. Con ello se pretende que los estudiantes recurran al balance de las interacciones que se rompen y se establecen en el transcurso de las reacciones, teniendo en cuenta los aspectos de estructura y enlace de las sustancias implicadas. La estabilidad de las sustancias formadas, en especial del CO_2, justifica la gran exotermia de estas reacciones de combustión.

La integración de la perspectiva *macroscópica* termoquímica con la perspectiva *microscópica* de los modelos de enlace dotará de un mayor poder descriptivo, explicativo y predictivo al marco teórico que los alumnos construyen en el aula. Al complementar ambos dominios de conocimiento, se introduce la posibilidad de no sólo describir, sino también justificar y predecir los aspectos energéticos de las reacciones químicas en términos de interacciones entre las partículas constituyentes del sistema.

Llegados a este punto de la intervención, se enfrentará al alumnado a situaciones problemáticas abiertas que posibiliten la transferencia del conocimiento. Mediante las

actividades *Fp14* y *Fp15*, que cierran la secuencia, se pretende que los estudiantes elaboren razonamientos justificativos para dar respuesta a problemas no tratados con anterioridad.

Actividad Fp14: la "entalpía de enlace"

Con esta actividad se pretende construir una perspectiva energética *microscópica* de la materia, con la introducción del concepto *variación de entalpía de enlace promedio*, ΔH_{enlace}, como un estimador de la fortaleza de un enlace químico. El objetivo principal de esta actividad pasa por que los alumnos construyan un razonamiento explicativo para justificar el carácter exotérmico de cuatro reacciones de combustión; surge para ello la necesidad de recurrir a los modelos de enlace y estructura.

Mediante esta estrategia se complementará la visión macroscópica de la Termodinámica Clásica con una perspectiva microscópica que dotará de un mayor poder explicativo y predictivo a los modelos de razonamiento de los alumnos, y que promoverá una adecuada integración de los dominios de conocimiento en los que se basa la Química.

Tabla 26: Guion de la actividad Fp14 – la "entalpía de enlace"

Actividad *Fp14*: la "entalpía de enlace"

A. A partir de las tablas de ΔH_f, calcula ΔH_c de los siguientes compuestos:

Etano: C_2H_6

Eteno (etileno): C_2H_4

Etino (acetileno): C_2H_2

Benceno: C_6H_6

B. Si te piden consejo en la elección de un combustible, ¿cuál de estos cuatro compuestos aconsejarías? Justifica tu respuesta.

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

La actividad comienza proponiendo a los alumnos el cálculo de ΔH_c para una serie de hidrocarburos sencillos (etano, etileno, acetileno y benceno) a partir de los correspondientes valores tabulados de ΔH_f.

A continuación, la actividad plantea un problema abierto: la elección de un combustible de entre los cuatro hidrocarburos propuestos. En la resolución de este problema, los alumnos han de reflexionar sobre una serie de conceptos implicados en diversas áreas de conocimiento. De la resolución de este problema abierto se derivan algunas conclusiones que permitirán encauzar el análisis termoquímico (macroscópico) hacia la introducción de los modelos microscópicos de enlace y estructura de la materia para explicar los aspectos energéticos asociados a las cuatro reacciones de combustión.

Las premisas para aplicar los datos termodinámicos tabulados a la resolución de los cálculos, son idénticas a las de la descripción de *Fp13*. Se considera que el sistema termodinámico experimenta la reacción en condiciones de *p* constante y de *T* moderadas o altas (condiciones para las cuales se pueden aplicar los datos tabulados de ΔH).

Se detallan a continuación las principales ideas clave que se pretenden desarrollar mediante la realización de esta actividad en al aula:

Al comienzo de la actividad, los alumnos relacionarán los valores de ΔH_f, recogidos en las tablas termodinámicas, con las ΔH_c de los compuestos de interés. Para ello, han de establecer las ecuaciones químicas que describen las reacciones de combustión correspondientes a cada uno de los cuatro hidrocarburos propuestos:

$H_3C\text{-}CH_{3\,(g)} + 7/2\ O_{2\,(g)} \rightarrow 2\ CO_{2\,(g)} + 3\ H_2O_{(l)}$ $\quad \Delta H_c\ [C_2H_{6\,(g)}]$

$H_2C{=}CH_{2\,(g)} + 3\ O_{2\,(g)} \rightarrow 2\ CO_{2\,(g)} + 2\ H_2O_{(l)}$ $\quad \Delta H_c\ [C_2H_{4\,(g)}]$

$HC{\equiv}CH_{(g)} + 5/2\ O_{2\,(g)} \rightarrow 2\ CO_{2\,(g)} + H_2O_{(l)}$ $\quad \Delta H_c\ [C_2H_{2\,(g)}]$

$C_6H_{6\,(l)} + 15/2\ O_{2\,(g)} \rightarrow 6\ CO_{2\,(g)} + 3\ H_2O_{(l)}$ $\quad \Delta H_c\ [C_6H_{6\,(l)}]$

En las tablas de datos termodinámicos figuran los valores de ΔH_f para las sustancias implicadas en estas reacciones de combustión:

Etano: $2\ C_{(s)} + 3\ H_{2\,(g)} \rightarrow H_3C\text{-}CH_{3\,(g)}$ $\quad \Delta H_f\ [C_2H_{6\,(g)}] = -84{,}7$ kJ/mol

Etileno: $2\ C_{(s)} + 2\ H_{2\,(g)} \rightarrow H_2C{=}CH_{2\,(g)}$ $\quad \Delta H_f\ [C_2H_{4\,(g)}] = +52{,}3$ kJ/mol

Acetileno: $2\ C_{(s)} + H_{2\,(g)} \rightarrow HC{\equiv}CH_{(g)}$ $\quad \Delta H_f\ [C_2H_{2\,(g)}] = +226{,}6$ kJ/mol

Benceno: $6\ C_{(s)} + 3\ H_{2\,(g)} \rightarrow C_6H_{6\,(l)}$ $\quad \Delta H_f\ [C_6H_{6\,(l)}] = +49{,}04$ kJ/mol

Dióxido de carbono: $C_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)}$ $\quad \Delta H_f\ [CO_{2\,(g)}] = -393{,}5$ kJ/mol

Agua: $H_{2\,(g)} + ½\ O_{2\,(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$ $\quad \Delta H_f\ [H_2O_{(l)}] = -285{,}8$ kJ/mol

El cálculo de ΔH_c a partir de las ΔH_f de las sustancias implicadas resulta:

Sea C_xH_y cualquier hidrocarburo de los propuestos. Para cualquiera de ellos se verifica que la variación de entalpía de combustión es:

$$\Delta H_c\ [C_xH_y] = (y/2)\ \cdot \Delta H_f\ [H_2O_{(l)}] + x \cdot \Delta H_f\ [CO_{2\,(g)}] - \Delta H_f\ [C_xH_y]$$

$$\Delta H_c\ [C_2H_{6\,(l)}] = -1559{,}7\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H_c\ [C_2H_{4\,(g)}] = -1410{,}9\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H_c\ [C_2H_{2\,(g)}] = -1299{,}4\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H_c\ [C_6H_{6\,(g)}] = -3267{,}4\ \text{kJ/mol}$$

Nuevamente se enfatizará en la adecuada utilización de la simbología matemática y en la necesidad de expresar los resultados de modo claro, conciso y conforme a las convenciones recomendadas por la comunidad científica.

Esta actividad se ha estructurado alrededor de las reacciones de combustión de cuatro hidrocarburos que los alumnos posiblemente conozcan, ya sea por su experiencia cotidiana, a través de los medios de comunicación o por el contexto del aula de ciencias. El etano es uno de los componentes del gas natural. Los tres hidrocarburos insaturados (etileno, acetileno y benceno) fueron utilizados como combustibles durante décadas. Por ejemplo, el etileno (*gas oleífico*) y el acetileno se contaron entre los combustibles utilizados entre los siglos XIX y XX en el alumbrado de gas en las ciudades.

Al hilo de estas reacciones de combustión, se planteará en el aula un problema abierto: ¿Cuál de los cuatro hidrocarburos propuestos es *el mejor combustible*? Este problema se ha diseñado para que los alumnos expliciten y justifiquen, mediante la argumentación, una serie de criterios en función de los cuales elegirían uno de estos cuatro compuestos como *combustible*, sin pretender que enfoquen su interés en ningún ámbito de aplicación concreto. En todo caso, el carácter abierto de este problema permite trasladar el debate hacia los criterios de elección de un combustible para aplicaciones concretas, desde las pequeñas máquinas domésticas hasta la maquinaria pesada industrial, el transporte (trenes, barcos, aviones…) y la ingeniería aeroespacial.

A diferencia de *Fp13*, donde se enfocaba el análisis termodinámico de varias reacciones químicas a través de la interpretación de un diagrama entálpico, esta actividad parte de un planteamiento diferente: se propone a los alumnos un problema abierto en cuya resolución no solamente han de tener en cuenta los aspectos energéticos de las reacciones químicas, sino que deben poner en juego una serie de conceptos que proceden de diversas áreas de conocimiento, y que se relacionan con diversos aspectos CTS.

De este modo se busca que los alumnos acepten la idea de que la eficiencia de un proceso termodinámico (ver actividad *Fp04*) no debe convertirse en el único factor de decisión a la hora de implementar el proceso a nivel industrial, o de generalizarlo en las aplicaciones a nivel doméstico. Existe una gran variedad de criterios que deben analizarse para decidir, entre una serie de compuestos afines, cuál resulta óptimo para un uso concreto a un determinado nivel de aplicación: doméstico, industrial o de laboratorio.

- Criterios termodinámicos: En la resolución de este problema, los alumnos han de reflexionar, en primer lugar, sobre lo que habitualmente se denomina en el lenguaje coloquial como *poder calorífico de los combustibles*; esto es, sobre la cantidad neta de energía, por unidad de materia, que se transfiere desde el sistema hacia el entorno. Para decidir cuál de estos compuestos transfiere una mayor cantidad de energía al entorno, se compararán sus distintos valores de ΔH_c. En concreto:

ΔH_c [$C_2H_{6\ (l)}$] = -1559,7 kJ/mol,	o bien,	ΔH_c [$C_2H_{6\ (l)}$] = -52,0 kJ/g
ΔH_c [$C_2H_{4\ (g)}$] = -1410,9 kJ/mol,	o bien,	ΔH_c [$C_2H_{4\ (g)}$] = -50,4 kJ/g
ΔH_c [$C_2H_{2\ (g)}$] = -1299,4 kJ/mol,	o bien,	ΔH_c [$C_2H_{2\ (g)}$] = -50,0 kJ/g
ΔH_c [$C_6H_{6\ (g)}$] = -3267,4 kJ/mol,	o bien,	ΔH_c [$C_6H_{6\ (g)}$] = -41,9 kJ/g

Desde el punto de vista meramente termoquímico, el combustible idóneo es el que libera, *a priori*, la máxima cantidad posible de energía por mol. En este caso, el benceno es el compuesto que libera mayor cantidad de energía por mol. Sin embargo, otros factores importantes pueden llevarnos a modificar este orden de prioridad:

- Disponibilidad *física* del combustible: por eficiente que sea desde el punto de vista energético la combustión de un compuesto, su aplicación a gran escala requiere que el combustible se encuentre *disponible* para su uso. La mayor o menor disponibilidad de un combustible dependerá, en primer lugar, de la abundancia de sus yacimientos naturales; o, en su defecto, de la abundancia de los precursores de síntesis que se comercialicen a escala industrial. Además, la accesibilidad de los yacimientos condicionará en gran medida su elección como producto de uso común: si un compuesto es escaso o poco asequible a su extracción, es posible que se decida elegir como combustible otro compuesto menos eficiente energéticamente por mol, pero más eficiente por unidad de masa. La cantidad de energía liberada en la combustión de 1 g de gas es mayor para el etano.
- Propiedades físicas y químicas del compuesto: además de la abundancia y la accesibilidad de extracción (o síntesis) del combustible, requisito no menos importante es que sus procesos de explotación, refino (purificación), manipulación, transporte, almacenamiento, utilización y desecho resulten poco dañinos y peligrosos para la sociedad y el medio ambiente. Ciertas propiedades de las sustancias aportan información que puede ayudar a tomar decisiones sobre estos aspectos. También el rendimiento de la reacción de combustión puede ayudar a decidir qué compuesto resulta más adecuado como combustible.

En particular, se prefieren compuestos con propiedades físicas tales como alta densidad, baja volatilidad, baja inflamabilidad… Por ejemplo, se preferirán los combustibles sólidos o líquidos, como el benceno, antes que los gaseosos. La principal propiedad química de un combustible ideal es la estabilidad (gran inercia a reaccionar) ante procesos químicos no deseados, como polimerizaciones, reacciones de degradación química, biológica o fotoinducida… En este caso, cualquiera de los cuatro compuestos puede considerarse adecuado, dada la poca reactividad de los hidrocarburos; el más inerte a prácticamente cualquier tipo de reacción es el etano.

Las propiedades deseables desde el punto de vista de la conservación del medio ambiente pueden analizarse también químicamente. Por ejemplo, un criterio útil para conocer el mayor o menor impacto de un combustible sobre la atmósfera es la cantidad de CO_2 que se produce por mol de combustible que reacciona. Más difíciles de analizar desde el punto de vista científico a nivel de Bachillerato son los aspectos relacionados con la salud humana, como pueden ser la toxicidad, la tendencia a la bioacumulación del compuesto o de productos de su degradación en el organismo humano… Queda a criterio del docente la decisión de tratar en menor o mayor profundidad estos aspectos.

- Disponibilidad geoestratégica: el diseño de la actividad permite abarcar las causas de la variabilidad en los precios de mercado de los combustibles. Esta cuestión implica diversos aspectos CTS relacionados con la extracción, el refino, el transporte, la utilización y el almacenamiento del combustible. Entre ellos destacamos el desarrollo de los medios técnicos e ingenieriles, los acuerdos comerciales entre países o regiones geopolíticas, y la evolución de la oferta y la demanda del combustible en el mercado. Todos estos factores tecnológicos, geográficos, políticos y sociales tienen una innegable incidencia sobre la elección de un compuesto químico para una determinada aplicación a gran escala.
- Otros aspectos CTS a desarrollar: la puesta en común de todas estas ideas permitirá introducir en el aula un debate en gran grupo sobre la conveniencia, los riesgos, las ventajas y los inconvenientes de utilizar los combustibles fósiles como recurso energético. Otros temas de gran interés son la búsqueda de recursos combustibles (y no combustibles) alternativos, el ahorro de los recursos energéticos disponibles en aras de la sostenibilidad, y la adecuación de los combustibles diferentes aplicaciones de interés social e industrial.

Hasta este punto llega el desarrollo de los aspectos macroscópicos que se tratan en la actividad. A continuación, se introducirá la perspectiva microscópica para explicar las transferencias energéticas de estas reacciones químicas. Con esta finalidad, y de modo análogo a como se procedió en la actividad anterior, se pedirá a los alumnos que comparen los valores de ΔH_c de las cuatro reacciones propuestas. Además, algunas de las ideas que han surgido pueden ser útiles a la hora de enfocar el análisis macroscópico de las combustiones hacia la introducción de los modelos de enlace y estructura de la materia; en particular, las propiedades físicas y químicas de los hidrocarburos pueden dar un punto de apoyo para relacionar los dominios macroscópico y microscópico.

Con esta estrategia se pretende que los estudiantes relacionen la estructura química de las sustancias implicadas en las reacciones de combustión, con la mayor o menor cantidad neta de energía liberada en la reacción. Posiblemente los alumnos perciban sin dificultades las semejanzas y diferencias entre las estructuras químicas de los cuatro hidrocarburos; quizá les resulte más difícil completar el balance de interacciones que se rompen y se establecen en el transcurso de las reacciones, teniendo en cuenta los aspectos de estructura y enlace de todos los compuestos implicados.

La investigación educativa ha puesto de manifiesto que los estudiantes presentan numerosas dificultades para interpretar desde el punto de vista microscópico los aspectos energéticos de las reacciones químicas; muchas de estas dificultades parecen partir de una concepción *pseudo*-materialística de la energía y de los enlaces químicos. En particular, muchos alumnos consideran que la energía liberada durante las reacciones de combustión (*energía contenida en los combustibles*) procede de la ruptura de enlaces en las moléculas de las sustancias combustibles (*energía almacenada en los enlaces*).

La extrapolación de explicaciones sobre el comportamiento macroscópico de la materia para explicar el comportamiento de los sistemas atómico-moleculares parece muy extendida entre las ideas del alumnado (Boo, 1998; Boo y Watson, 2001): si se necesita energía para construir estructuras (macroscópicas), entonces "hacer" enlaces debe requerir energía. Esta energía se libera cuando los enlaces se rompen, de modo similar a lo que sucede cuando una estructura (macroscópica) se desmorona.

Con el objetivo de superar estas dificultades de aprendizaje, consideramos necesario explorar las ideas de los alumnos sobre la los procesos de formación y ruptura de enlaces químicos, y sobre las transferencias energéticas involucradas en las reacciones químicas. Para ello, recomendamos realizar una puesta en común de ideas, en la que se hagan explícitas las hipótesis de los alumnos sobre las diferencias que existen entre los valores de ΔH_c de estos compuestos. Esta puesta en común, en gran grupo, proporciona una buena ocasión al docente para explorar si entre el alumnado predominan concepciones *pseudo*-materialísticas de la energía y de los enlaces químicos.

Una vez explicitadas las hipótesis de los alumnos, el docente guiará las ideas del alumnado hacia las aceptables desde el punto de vista de la ciencia escolar:

Se introducirá el concepto de "*entalpía de enlace*" como un parámetro estimador de la fortaleza de un enlace químico. Se definirá ΔH_{enlace} como la variación de entalpía asociada al proceso de ruptura de un enlace químico. De este modo, el concepto ΔH_{enlace} adquiere significado como la cantidad de energía necesaria para romper un determinado tipo de enlace entre dos átomos.

Se promoverá una reflexión, en gran grupo, sobre la terminología utilizada en los libros de texto y en los textos científicos para referirse a la "entalpía de enlace". En primer lugar, se insistirá en que la expresión "entalpía de enlace" para designar a ΔH_{enlace} es poco rigurosa. La expresión "calor de enlace" no debe utilizarse como sinónimo de "variación de entalpía de enlace"; se enfatizará en que ambas nociones no son equivalentes, aunque sí coincidentes si la reacción tiene lugar en condiciones de presión constante. Sí está admitido por la comunidad científica (Levine, 1995) el término "energía de enlace" como aproximación a ΔH_{enlace}, puesto que la diferencia entre la energía de enlace y la variación de entalpía de enlace no suele ser significativa.

Obviamente, cualquier variación de entalpía de enlace es necesariamente positiva ($\Delta H_{enlace} > 0$), puesto que, para llevar a cabo la disociación de un enlace, hay que debilitar las interacciones estables que existen entre los átomos implicados; para ello se requiere un aporte de energía igual a ΔH_{enlace}. Cuanto más estable (*más fuerte*) sea la interacción entre dos átomos, mayor cantidad de energía ha de aportarse para debilitarla. Así, a los enlaces de mayor orden (triples, dobles) se les asocia un mayor valor de ΔH_{enlace}. Por ejemplo, la disociación de los enlaces C-C simples se logra con aportar al sistema ~347 kJ/mol; mayor aporte energético requiere la disociación de los enlaces dobles C=C (~620 kJ/mol); para romper un triple enlace C≡C se precisa el aporte de ~812 kJ/mol. El caso del benceno

ilustra la gran estabilidad de los sistemas conjugados: ΔH_{enlace}[benceno] = 518 kJ/mol. Este elevado valor de ΔH_{enlace} da una idea de la estabilidad que el fenómeno de resonancia introduce en los compuestos bencénicos, cuyos enlaces *resonantes* tienen una fuerza casi comparable con la de un enlace doble C=C.

Los valores de las "entalpías de enlace" resultan útiles para estimar las variaciones de entalpía de las reacciones. No obstante, los valores de ΔH_r proporcionados por este tipo de cálculos deben tomarse como meras aproximaciones, en especial en caso de las moléculas cuya estructura química implique efectos de estabilización o desestabilización adicionales, que obligan a introducir correcciones en los cálculos. Tal es el caso de las moléculas que contienen anillos, grupos voluminosos o sistemas conjugados (como es el caso del benceno). De todas formas, incluso en estos casos, las tablas de entalpías de enlace permiten estimar con cierta fiabilidad los valores de ΔH_r para procesos en los que intervenga alguna especie recientemente sintetizada, para la que no se disponga de ΔH_f.

Los alumnos han de identificar las rupturas de enlaces como procesos endotérmicos, y las formaciones de enlaces como procesos exotérmicos. La distribución energética del sistema durante una reacción variará como consecuencia de estos procesos.

Haciendo uso de estas ideas, los alumnos construirán un razonamiento justificativo que relacione los aspectos energéticos de las reacciones de combustión (exotermia, mayor o menor liberación *neta* de energía) con la estabilidad de los enlaces disociados y formados durante la misma. El análisis *microscópico* de las transferencias energéticas de estas reacciones puede comenzar con un balance de los enlaces que se rompen y se forman en cada una de las combustiones. Un ejemplo de *balance energético microscópico* se recoge en la *Tabla 27*.

Tabla 27: balance energético microscópico de las reacciones propuestas en la actividad Fp14

PROCESO	**Nº DE ENLACES ROTOS**						**Nº ENLACES FORMADOS**		**ΔH estimada**
SUSTANCIA	C-H	C --- C				O=O	C=O	O-H	
		C-C	C=C	C≈C	C≡C				
C_2H_6	6 enl. (2484 kJ)	1 enl. (347 kJ)	-	-	-	7/2 enl. (1747 kJ)	4 enl. (-3196 kJ)	6 enl. (-2952 kJ)	-1570 kJ
C_2H_4	4 enl. (1656 kJ)	-	1 enl. (620 kJ)	-	-	3 enl. (1497 kJ)	4 enl. (-3196 kJ)	4 enl. (-1968 kJ)	-1391 kJ
C_2H_2	2 enl. (828 kJ)	-	-	-	1 enl. (812 kJ)	5/2 enl. (1248 kJ)	4 enl. (-3196 kJ)	2 enl. (-984 kJ)	-1292 kJ
C_6H_6	6 enl. (2484 kJ)	-	-	6 enl. (3168 kJ)	-	15/2 enl. (3743 kJ)	12 enl. (-9588 kJ)	6 enl. (-2952 kJ)	-3145 kJ

La cantidad de energía que se requiere para romper un número *n* de enlaces X-Y es *n* veces la cantidad de energía requerida para romper un enlace X-Y; análogamente, la cantidad de energía que se libera con el establecimiento de un número *n* de enlaces X-Y es *n* veces la cantidad de energía liberada al formarse un enlace X-Y. Este razonamiento microscópico explica el carácter extensivo de la magnitud ΔH_r: la cantidad de energía transferida entre el sistema y su entorno durante una reacción química depende del

número de interacciones que se rompan y del número de interacciones que se establezcan entre las partículas del sistema.

La gran exotermia de estas reacciones de combustión viene justificada, desde el punto de vista microscópico, la por gran estabilidad de las sustancias formadas en la reacción. Desde el punto de vista de la ciencia escolar se admite que:

En esencia, ha de aportarse energía para comenzar la combustión: los compuestos inicialmente presentes (reactivos) son estables en las condiciones descritas, hasta que se les aporte la energía suficiente como para superar la barrera energética de disociación de los enlaces. La recombinación de los fragmentos moleculares disociados es altamente exotérmica, puesto que supondrá la formación de enlaces muy estables. Iniciada la reacción, se producen simultáneamente numerosos procesos de ruptura de enlaces en los reactivos y de formación de nuevos enlaces para generar productos. La exotermia de estas reacciones de combustión se debe a la *gran liberación neta* de energía que se produce como consecuencia de la formación de los productos CO_2 y H_2O, en comparación al *menor aporte de energía* necesario para fragmentar las moléculas de hidrocarburo. En las reacciones de combustión de estos compuestos, la principal contribución a la exotermia de reacción se debe a la formación de los enlaces C=O del CO_2, extraordinariamente estables, y, en menor medida, a la formación de los enlaces H-O en el agua.

La integración de ambos dominios de conocimiento, macroscópico y microscópico, y la utilización del dominio simbólico, construyen un andamiaje de conocimiento de gran poder explicativo y predictivo.

La actividad concluye con la siguiente idea central: el balance entálpico de una reacción, que indica la exotermia o endotermia de la misma, depende de la estabilidad que el sistema gane o pierda como consecuencia de la ruptura y formación de enlaces. Serán reacciones exotérmicas aquéllas en las que liberación de energía debida a la formación de enlaces altamente estables en los productos supere el aporte energético para romper enlaces en los reactivos; como consecuencia de la estabilización del sistema, parte del excedente neto de la energía se transfiere al entorno. Por el contrario, en las reacciones endotérmicas, la liberación de energía que se produce con la formación de enlaces en los productos no es suficiente para superar el aporte energético neto que se requiere para romper enlaces en los reactivos, y por ello, en total, se absorbe energía del entorno.

La introducción de esta perspectiva *microscópica* de los modelos de enlace y de estructura de la materia aporta un mayor poder explicativo, interpretativo y predictivo a la perspectiva macroscópica de la Termodinámica Clásica. Con la integración de los tres dominios de conocimiento se obtiene un marco conceptual y procedimental más útil a la hora de describir y justificar los aspectos energéticos de las reacciones químicas.

A continuación, mediante la actividad *Fp15*, los alumnos aplicarán estos modelos de la Química microscópica en la elaboración de razonamientos justificativos sobre el proceso metabólico de los carbohidratos y de los lípidos.

Actividad Fp15: ¿"quemando calorías"?

Tabla 28: Guion de la actividad Fp15 – ¿"Quemando calorías"?

Actividad *Fp15*: ¿"quemando calorías"?

Los alimentos que ingerimos se metabolizan en una serie de etapas en las que intervienen las enzimas, que son moléculas con función "biocatalizadora".

Alimento	Valor energético (kJ/g)
Manzana	-2
Carne de res	-8
Cerveza	-1,5
Pan	-11
Mantequilla	-34
Queso	-18
Huevos	-6
Leche	-3

Un aspecto interesante del metabolismo de los carbohidratos y de los lípidos es que podemos considerar su proceso metabólico (en conjunto) como una reacción oxidativa similar a una combustión. Las diferencias más importantes entre la "combustión metabólica" y cualquier combustión calorimétrica son tres:

1.- El grado de oxidación que alcanzan los reactivos: En las reacciones de combustión se alcanza la oxidación máxima, mientras que la oxidación metabólica puede ser considerada como una "combustión parcial".

2.- Las temperaturas a las que se producen: La temperatura de las combustiones típicas es muy superior a la de la oxidación de los nutrientes durante los procesos metabólicos.

3.- El número de etapas involucradas: Mientras que una combustión puede considerarse como un único proceso, el metabolismo es un proceso que consta de un gran número de etapas.

Además, la "combustión metabólica" es mucho más eficiente que la calorimétrica. En los calorímetros, buena parte de la energía del combustible se cede al entorno; por el contrario, en los sistemas vivos, la mayor parte de la energía liberada en las etapas metabólicas exotérmicas se invierte en el funcionamiento del organismo.

A. ¿A qué se refiere la expresión "contenido calórico" de los alimentos? ¿Te parece científicamente adecuada? Justifica tu respuesta.

B. En la publicidad, se utiliza muy frecuentemente la expresión "quemar calorías". Desde el punto de vista científico, ¿crees que esta expresión es adecuada? Justifica tu respuesta.

C. ¿Por qué los valores de "contenido calórico" de los alimentos suelen expresarse en kcal/g, y no en kcal/mol?

D. ¿A qué se deben las diferencias que observas entre los datos de "valores energéticos" para los diferentes alimentos?

E. ¿Crees que los datos de "contenido energético" de los alimentos nos ayudan a seleccionar los alimentos adecuados para una dieta saludable? ¿Necesitamos alguna información adicional para adecuar nuestra dieta a nuestras necesidades? Justifica tus respuestas.

F. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

La actividad *Fp15* aborda el análisis del metabolismo de los carbohidratos y de los lípidos como un proceso termodinámico. En esta actividad de aplicación, se ofrece al alumnado un texto donde se exponen las principales similitudes y diferencias entre los procesos de combustión calorimétrica y el proceso metabólico en su conjunto.

Se propone al alumnado reflexionar sobre dos expresiones muy utilizadas en la sociedad, especialmente en los medios de comunicación. Con ello se pretende que los alumnos sean conscientes de la influencia del lenguaje cotidiano y del lenguaje publicitario en la comunicación de ideas. Se trata, fundamentalmente, de que los estudiantes acepten y valoren el lenguaje de la vida cotidiana y sus ámbitos de utilización, reconociendo, a su vez, la importancia del lenguaje científico en la construcción y la divulgación de conocimiento. Esta reflexión sobre los ámbitos de utilización del conocimiento ayudará a los alumnos a valorar sus conocimientos científicos en relación con temas que suelen concebirse socialmente como desconectados de la Ciencia, e incluso incompatibles con ella.

La principal intención de esta actividad es que los alumnos integren los dominios de conocimiento macroscópico (termoquímico) y microscópico para construir un razonamiento explicativo que les permita tomar decisiones *científicamente fundamentadas* sobre la nutrición.

La expresión cotidiana "contenido calórico de los alimentos" se refiere a la transferencia neta de energía (desde el sistema reaccionante hacia el entorno) que tiene lugar en la oxidación metabólica de los nutrientes contenidos en los alimentos. Esta expresión se considera inadecuada desde el punto de vista de la ciencia escolar, puesto que identifica como objeto ("contenido calórico") lo que desde el punto de vista científico se considera un proceso: el calor, mediante el cual se transfiere energía entre un sistema reaccionante y su entorno como consecuencia de la estabilización que supone para el sistema el establecimiento de enlaces más estables que los que se rompen durante la reacción. Una revisión de la literatura científica sobre las dificultades de aprendizaje en el campo de la Termodinámica de los procesos químicos (Pereira García y Domínguez Castiñeiras, 2008) revela que precisamente muchas de las ideas alternativas más resistentes al cambio conceptual se relacionan con una clasificación de los conceptos termodinámicos en categorías ontológicas inadecuadas (Chi *et al.*, 1994). En particular, la confusión de un proceso con un objeto implica una identificación inadecuada entre dos categorías ontológicas claramente diferenciadas, según Chi *et al.* (1994): los eventos y la materia.

Es posible que esta identificación inadecuada de conceptos que pertenecen a categorías ontológicas diferentes tenga una relación directa con la concepción *pseudo*-materialística de las transferencias de energía; en todo caso, lograr un cambio conceptual entre categorías ontológicas supone vencer grandes problemas, y las ideas alternativas relacionadas con este tipo de identificaciones muestran una extraordinaria persistencia. Para superar estas dificultades de aprendizaje, consideramos necesario que los alumnos sean conscientes de que, aunque el lenguaje cotidiano tiene plena validez dentro de su ámbito de aplicación, resulta ambiguo o poco específico cuando se pretende utilizar en contextos que requieren mayor precisión en la terminología. No se trata de "excluir al lenguaje cotidiano" como forma de expresión práctica y funcional desde el punto de vista

comunicativo: se trata de hacer ver al alumnado que, en determinados ámbitos o en determinadas ocasiones, la polisemia y la ambigüedad del lenguaje cotidiano pueden dificultar el consenso de significados, mientras que el lenguaje de la ciencia allana el camino para la construcción de significados comunes y más precisos en la comunicación. Esta idea acerca a los alumnos a participar del lenguaje de la ciencia (Lemke, 1997), sin dejar de valorar el lenguaje cotidiano como forma de expresión y comunicación humana.

Podemos analizar desde una óptica similar la expresión cotidiana "quemar calorías". Buena parte de nuestra sociedad acepta la creencia de que los alimentos ricos en carbohidratos y en lípidos "contienen calorías" que "quemamos" durante nuestra actividad diaria. Con esta actividad se pretende que los alumnos encuentren mayor poder explicativo en el razonamiento justificativo de la ciencia escolar, según el cual la exotermia de estas reacciones es consecuencia de que el proceso oxidativo metabólico, *en su conjunto*, implica la formación de enlaces muy estables con respecto a los enlaces que se rompen en los reactivos.

Según el conocimiento científicamente aceptado, algunos enlaces de estas moléculas son susceptibles de sufrir procesos oxidativos durante los procesos metabólicos. Como consecuencia de estas reacciones oxidativas, desde el sistema reaccionante se libera una cantidad de energía que el organismo reinvierte en la realización de diversos procesos físicos y químicos necesarios para la vida. Entre estos procesos físicos podemos citar la regulación de la temperatura corporal y la realización de trabajo muscular; ejemplos de procesos químicos imprescindibles para la vida son la síntesis de sustancias necesarias para el mantenimiento y desarrollo celular (proteínas, ácidos nucleicos…), o procesos de transporte intracelular y extracelular de iones, de neurotransmisores, etc.

Una vez desarrolladas estas ideas, se pedirá a los estudiantes que transfieran sus conocimientos para comparar los "valores energéticos" de una serie de alimentos. En particular, se pretende que el alumnado relacione la oxidación metabólica de los carbohidratos y de los lípidos con la mayor o menor cantidad de energía liberada en el proceso. Las principales ideas implicadas en esta relación son:

Los alumnos han de reconocer la estructura molecular de los carbohidratos y de los lípidos. Quizá la principal dificultad en este punto se encuentre en identificar la estructura química común a los lípidos, que constituyen una familia de biomoléculas extraordinariamente heterogénea. Para superar esta dificultad, se facilitará al alumnado la estructura molecular de los ácidos grasos, lípidos presentes en una gran variedad de alimentos tanto de origen vegetal como de origen animal.

En los aceites predominan los ésteres de los ácidos grasos insaturados (por ejemplo, del ácido oleico), mientras que las grasas contienen mayoritariamente ésteres de ácidos grasos saturados (como el palmítico o el esteárico). Al someter los aceites vegetales insaturados de origen vegetal al proceso industrial de hidrogenación catalítica, se

obtienen sustancias saturadas o parcialmente saturadas que, por su alto contenido en ácidos grasos hidrogenados, se presentan sólidas o semisólidas, como la margarina.

Dada la exotermia de estas oxidaciones metabólicas, podemos considerar que las moléculas carbohidratadas y lipídicas ejercen una función orgánica de "reservas potenciales de energía" a nivel celular. Esta idea, científicamente aceptada, se contrapone al rol de "almacenamiento de energía" que se atribuye a carbohidratos y a lípidos, y que nuevamente se relaciona con una concepción *pseudo*-materialística de la energía y de los enlaces químicos (Boo, 1998).

El "valor energético" de un alimento proporciona una estimación de la variación de entalpía asociada a la oxidación de los carbohidratos y los lípidos contenidos en el alimento. El metabolismo de estas sustancias puede explicarse atendiendo a sencillos modelos de enlace y estructura de la materia, siempre que se entienda el metabolismo como un proceso muy complejo, y mediado por enzimas cuya intervención hace posible que todas sus etapas tengan lugar en condiciones fisiológicas.

Dejamos a juicio del docente el grado de complejidad con la que se abordará el tratamiento de estas reacciones metabólicas. El objetivo principal con el que se introducen estas relaciones es que los alumnos pongan en cuestión la idea alternativa del "contenido en calorías" de los alimentos.

Al final de esta actividad, se pretende que los alumnos transfieran sus conocimientos para tomar decisiones un problema concreto de gran importancia social: la elección de una dieta saludable.

A este respecto, es innegable que el "valor energético" de los alimentos es un dato útil a la hora de calcular qué aporte energético nutricional se adapta mejor a la actividad de cada individuo.

En cuanto a la energía implicada en estas reacciones metabólicas, se pondrá de manifiesto que la oxidación de las biomoléculas libera al entorno una cantidad de energía proporcional al grado de oxidación de las mismas. Por ello, los alimentos que contienen gran cantidad de ácidos grasos aprovechan metabólicamente una cantidad de energía notablemente mayor que la obtenida como consecuencia del metabolismo de los alimentos carbohidratados.

Pero, además, una dieta saludable debe basarse en la adecuada *variedad y calidad* de los alimentos. De aportar al organismo cantidades equilibradas de diversos nutrientes: proteínas, vitaminas y oligoelementos; entre éstos últimos destacan las sales de iones monovalentes y divalentes (sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro, zinc, manganeso…)

Descripción de las actividades de la secuencia *Termodinámica Química*

A continuación se describen las dieciséis actividades en las que se estructura la secuencia *Termodinámica Química*:

La aplicación de esta propuesta en el aula constituye la fase de intervención, que tiene lugar una vez que profesor y alumnado se han acomodado a la nueva metodología.

A continuación se describen pormenorizadamente las dieciséis actividades que componen la secuencia *Termodinámica Química*, con las cuales se pretende dar sentido a los principales conceptos y enunciados mediante los que la Ciencia aborda el tratamiento termodinámico de los sistemas materiales y de las transformaciones que suceden en ellos. El conocimiento que se pretende promover involucra la explicitación y el desarrollo de destrezas, estrategias y procedimientos relacionados con el diseño, la planificación, la realización, el análisis, la discusión y la comunicación de experiencias de laboratorio.

La descripción de las actividades se organiza de la siguiente manera:

Bloque I: la entropía y los sistemas químicos

En la secuencia *Termoquímica*, los alumnos construyeron una serie de conceptos y relaciones termodinámicas que giran en torno al primer principio. Con ellos pueden describir los sistemas termodinámicos e interpretar, dado un proceso termodinámico concreto, las transferencias de energía que éste involucra entre el sistema y su entorno. Pero ninguno de los conceptos y enunciados que se desarrollan en las actividades de la secuencia *Termoquímica* ayuda a predecir cómo va a evolucionar un sistema químico.

A lo largo del *Bloque I* (actividades *Fi01 – Fi07*) de la secuencia *Termodinámica Química*, se presentan al alumnado la reversibilidad, la espontaneidad y la entropía, además del segundo principio y del tercer principio de la Termodinámica. El objetivo de este bloque de actividades es ayudar a los alumnos a construir nuevos conceptos y enunciados útiles para explicar y predecir el sentido de evolución de los sistemas.

La secuencia de actividades comienza planteando la necesidad de incorporar nuevos conceptos y relaciones, más allá de la Termoquímica, para conocer *a priori* qué procesos físicos y/o químicos experimentará el sistema objeto de estudio en unas condiciones dadas. Se construyen y reestructuran de este modo (actividad *Fi02*) los conceptos de reversibilidad y de espontaneidad, antes de introducir una nueva magnitud termodinámica que permita predecir el sentido de evolución de los sistemas químicos. Esta magnitud es la entropía, cuyo estudio centrará las actividades desde *Fi03* hasta *Fi07*. La función entropía se presenta desde el punto de vista macroscópico, en relación con el segundo principio de la Termodinámica y con las transferencias de energía que tienen lugar en los sistemas termodinámicos aislados (actividad *Fi03*). Mediante la actividad de aplicación *Fi04* se propondrá a los alumnos que transfieran sus conocimientos sobre el segundo principio para dar respuesta al problema histórico del móvil perpetuo de segunda especie, antes de desarrollar, en *Fi05*, una perspectiva microscópica que explique la naturaleza de la variable termodinámica entropía (macroscópica).

Por otra parte, mediante la actividad *Fi06* se introducirán el tercer principio de la Termodinámica y la escala absoluta de entropías.

Las actividades de aplicación *Fi06* y *Fi07*, que cierran el primer *Bloque* de la secuencia *Termodinámica Química*, exigirán al alumnado la aplicación de los conocimientos construidos a lo largo de las actividades anteriores; al transferir sus conocimientos, los alumnos serán capaces de interpretar los estados termodinámicos (*Fi06*) y los procesos termodinámicos (*Fi07*) de sistemas fisicoquímicos sencillos.

Actividad Fi01: exotermia y espontaneidad…

La secuencia de actividades *Termodinámica Química* comienza presentando a los alumnos una situación *poco usual* para ellos: la disolución de una *ingente* cantidad de sal común en un recipiente *enorme*:

Tabla 29: Guion de la actividad Fi01 – exotermia y espontaneidad…

Actividad *Fi01*: exotermia y espontaneidad…

Ya sabes que se pueden medir variaciones de entalpía mediante los métodos calorimétricos a presión constante, y que estas variaciones de entalpía pueden corresponder a procesos físicos o químicos.

Por ejemplo, en un calorímetro a presión constante podemos determinar la variación de entalpía correspondiente a la disolución de una sal iónica en agua.

A. Imagina que disuelves a temperatura ambiente, en un calorímetro abierto gigante, una gran cantidad de sal común, NaCl, en un gran volumen de agua. ¿Qué valor (aproximado) de ΔH esperarías que presente este proceso? Justifica tu respuesta.

$$NaCl_{(s)} \rightarrow Na^{+}_{(aq)} + Cl^{-}_{(aq)}$$

B. Si realizaras esta experiencia en un gran recipiente no adiabático (es decir, que pudiese transferir energía con el entorno mediante el proceso calor), ¿qué sensación crees que percibirías al tocar las paredes del recipiente?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Las ideas clave en torno a las que se estructura esta actividad son las siguientes:

El principal objetivo es poner de manifiesto la insuficiencia de los conceptos y enunciados termoquímicos para dar respuesta al problema propuesto. Con esta finalidad, al principio de la actividad se pregunta a los alumnos qué valor de ΔH esperan encontrar para un proceso endotérmico: la disolución del cloruro de sodio en agua. Aunque la disolución de sal común en agua es muy significativa para el alumnado, posiblemente los estudiantes nunca hayan reflexionado sobre las transferencias de energía que acompañan a este proceso físico (la ΔH molar de este proceso es muy pequeña).

Revisada la literatura científica sobre las ideas alternativas y las dificultades de aprendizaje relacionadas con la Termodinámica, consideramos necesaria una exploración de ideas antes de comenzar a construir en el aula el concepto de espontaneidad de los procesos termodinámicos. Numerosos investigadores han señalado que uno de los

principales obstáculos en la construcción de este concepto es la relación alternativa que muchos alumnos sostienen entre la exotermia de los procesos y la espontaneidad de los mismos (Johnstone *et al.*, 1977; Beall, 1994; Boo y Watson, 2001; Teichert y Stacy, 2002). Uno de los propósitos de esta actividad es explorar si los alumnos establecen alguna relación alternativa entre exotermia de los procesos y espontaneidad, como por ejemplo: todo proceso que sucede, sucede porque el sistema libera energía al exterior (el sistema se estabiliza). Entonces, la disolución de sal común en agua "debe ser exotérmica".

Al presentar la disolución de la sal común en unas circunstancias completamente diferentes de las cotidianas, se enfrenta al alumnado a un proceso termodinámico conocido, pero abstraído de cualquier contexto conocido. Este planteamiento servirá para poner en evidencia una idea que puede parecer obvia, pero que suele ofrecer problemas a los alumnos (ver, por ejemplo, Ross, 1993): todo proceso físico o químico se acompaña de transferencias de energía; es posible que, en determinadas condiciones, estas transferencias se hagan indetectables, si no disponemos de los medios adecuados para medirlas.

Aunque haciendo uso de un razonamiento microscópico sí se puede estimar la magnitud aproximada del valor de ΔH para este proceso de disolución, las conclusiones a las que se puede llegar con los conocimientos desarrollados en el aula son poco precisas:

La solvatación de la sal común implica el desmoronamiento de la red iónica de NaCl (proceso endotérmico) y el establecimiento de interacciones ión-dipolo entre las moléculas dipolares de agua y los iones sodio y cloruro (proceso exotérmico). La cantidad de energía que, en conjunto, requiere el debilitamiento de las interacciones de la red cristalina (bastante estable) es, aproximadamente, del mismo orden que la cantidad de energía que se libera al establecerse las interacciones (bastante estables) entre los iones de la sal y los dipolos del agua. De hecho, el balance neto de energía, o la transferencia neta de energía durante el proceso, si éste tiene lugar a presión constante, equivale a ΔH_{dis} (NaCl) = +0,4 kJ/mol NaCl.

Se insistirá en la idea de que, cuando un proceso termodinámico de interés tiene lugar en disolución, o bien cuando al menos uno de los reactivos o productos de una reacción de interés se encuentra en disolución, para estudiar termodinámicamente el proceso se ha de tener en cuenta que las transferencias energéticas que se producirán en el seno de la disolución son distintas de las que producirían las interacciones de las sustancias puras; además, estas transferencias energéticas dependen de la concentración de la disolución.

Una vez que los alumnos hayan manifestado en voz alta sus ideas sobre el valor de ΔH_{dis} (NaCl), el profesor facilitará el dato de las tablas termoquímicas: ΔH_{dis} (NaCl) = +4,0 kJ/mol (a T = 25 ^{o}C). Llegados a este punto, queda explícito que la disolución de la sal común en agua es un proceso endotérmico. El dato de ΔH_{dis} (NaCl) informa sobre el resultado neto de las transferencias de energía entre el sistema (compuesto por la sal

común y el agua) y su entorno: existe una transferencia neta de energía desde el entorno hacia el sistema.

Esta idea servirá para clarificar que el hecho de que un sistema requiera energía en la realización de un determinado proceso, no quiere decir que el proceso "sea inviable" en las condiciones consideradas. Existen numerosos procesos endotérmicos que suceden de forma natural (espontáneamente), y que forman parte de la experiencia del alumnado. Un ejemplo sencillo es la evaporación del alcohol etílico o la acetona (propanona) sobre la piel: al colocar unas gotas de etanol o de acetona sobre una mano, percibiremos una *sensación de frío*, en tanto que el líquido se evapora. Esta sensación fisiológica de frío se debe a que, asociada a la vaporización del líquido, existe una transferencia neta de energía (por calor) desde la piel (entorno) hacia el sistema (formado por las gotas de líquido).

De este modo, se evidencia que no existe una relación directa entre el signo de ΔH y el sentido natural de las transformaciones que tienen lugar en los sistemas termodinámicos: el criterio entálpico no es válido para predecir si un proceso ocurrirá o no en unas condiciones dadas.

Partiendo de esta aproximación se desarrollará la principal idea que se pretende poner de manifiesto en esta actividad: aunque la Termoquímica conforma un campo teórico y procedimental suficientemente completo como para describir cualquier proceso termodinámico que se produzca en un sistema en unas condiciones dadas, el marco termoquímico presenta dos grandes limitaciones:

Los conceptos y enunciados termoquímicos no aportan ninguna información sobre los aspectos cinéticos de los procesos termodinámicos.

Además, utilizando el marco termoquímico no es posible conocer, *a priori*, si el sistema objeto de estudio cambiará su estado termodinámico en las condiciones dadas; tampoco es posible predecir qué proceso termodinámico determinado será viable en el sistema considerado.

En relación con estas limitaciones de la Termoquímica pueden desarrollarse tres importantes aspectos en las que se incidirá a lo largo de esta secuencia de actividades:

- Implicación *cinética*: la Termodinámica no aporta ninguna información sobre la velocidad de los procesos; desde su perspectiva, se estudian la naturaleza y los cambios energéticos de los procesos que tienen lugar en los sistemas materiales, pero no la velocidad a la que suceden dichos procesos.
- Implicación *termodinámica*: los procesos que tienen lugar en un sistema y en unas condiciones determinadas, suceden en un solo sentido, que es siempre el mismo; si en unas condiciones se verifica un proceso concreto, el proceso contrario no tendrá lugar, salvo que cambien las condiciones a las que se halla sometido el sistema. Este hecho, constatado por la experiencia, es la base del concepto de espontaneidad.

- Implicación *de equilibrio*: dada la complejidad del concepto de reversibilidad, creemos conveniente no introducirlo hasta haber explorado las ideas de los alumnos sobre la espontaneidad y la evolución de los sistemas termodinámicos. El docente atenderá a las ideas que puedan surgir en el aula sobre la reversibilidad de los procesos y sobre los aspectos de equilibrio.

Se incidirá en que el concepto de espontaneidad se relaciona con la viabilidad natural de los procesos: un proceso espontáneo es aquél que tiene lugar en el sistema sin que medie intervención externa; ello no significa que sobre el sistema no actúe ningún tipo de fuerza o de interacción con el entorno, sino que el sistema no se ve sometido a ninguna condición más que las impuestas en el estado inicial. Es decir: se denomina espontáneo al proceso que ocurre de manera natural, mientras que cualquier otro proceso se considera no espontáneo, puesto que no ocurre. El docente prestará atención al lenguaje utilizado en el aula: asociar la viabilidad natural de los procesos a la espontaneidad puede contribuir a reforzar ideas alternativas si no se conectan estos nuevos conocimientos con los que el alumnado ha construido hasta el momento:

El concepto de espontaneidad puede referirse a cualquier proceso que suceda en cualquier tipo de sistema, y el sistema objeto de estudio puede estar sometido a cualquier tipo de fuerza o interacción (incluso puede ser un sistema abierto).

Supongamos que un sistema se encuentra en un estado inicial A, en cuyas condiciones un proceso concreto no se produce (no es espontáneo). Haciendo variar las condiciones iniciales del sistema, es posible que el proceso en principio no espontáneo llegue a producirse. Este caso no entra en conflicto con el concepto de espontaneidad: el proceso considerado no era espontáneo en las condiciones del estado A, pero si las condiciones del sistema han variado, éste se encuentra en un estado B cuyas condiciones hacen que el proceso sí sea espontáneo. Esta introducción de la espontaneidad de los procesos en función de los estados del sistema puede ayudar a poner en cuestión las ideas alternativas que relacionan espontaneidad con irrevocabilidad (Mirone y Benedetti, 2001): un proceso es espontáneo en unas determinadas condiciones iniciales que lo favorecen, pero será no espontáneo si las condiciones del estado inicial no lo favorecen.

Al revisar la literatura científica en relación con las ideas alternativas sobre el concepto de espontaneidad, se constata entre los alumnos una marcada tendencia a relacionar la espontaneidad de los procesos con aspectos cinéticos:

La mayoría de los alumnos atribuyen al término espontaneidad una serie de acepciones próximas o coincidentes con las que ofrece el lenguaje cotidiano (Ribeiro *et al.*, 1990; Ross, 1993; Ochs, 1996; Selepe y Bradley, 1997; Boo, 1998; Sözbilir, 2002, 2004). Estas acepciones otorgan a la espontaneidad significados sinónimos (totales o parciales) a movimiento rápido aleatorio, de acción inmediata o con rapidez, o de acción observable o no dirigida. Algunos de estos significados parecen involucrar implícitamente el concepto cinético de energía de activación.

Desde la investigación educativa se advierte de que muchos alumnos tienden a relacionar la espontaneidad de los procesos químicos con la velocidad los mismos (Beall, 1994) o con la irrevocabilidad (Mirone y Benedetti, 2001). En este sentido, consideramos fundamental explorar las ideas de los alumnos en torno a tales nociones.

Para hacer reflexionar a los alumnos sobre la relación entre la espontaneidad (aspecto termodinámico) y la velocidad del proceso (aspecto cinético), se analizará la disolución de la sal común desde la perspectiva microscópica basada en el modelo de partículas. La viabilidad del proceso de disolución depende de las condiciones del estado inicial del sistema (temperatura, presión…), que favorecen la ruptura de unas interacciones y la formación de otras; y es completamente independiente de la mayor o menor velocidad a la que tenga lugar el proceso.

La actividad termina con la siguiente idea: al explicitar las limitaciones de la Termoquímica, se hace evidente la necesidad de buscar una nueva magnitud (variable) termodinámica que permita predecir la evolución de los sistemas. Esta magnitud ha de ser, pues, una función de estado extensiva del sistema.

Esta nueva variable, la entropía, se presenta al alumnado en la actividad *Fi02*, mediante la cual se pretende reestructurar, integrar y ampliar las ideas desarrolladas hasta este momento de la intervención.

Actividad Fi02: (ir)reversibilidad

En la actividad *Fi02*, se facilita información al alumnado sobre los conceptos de espontaneidad e irreversibilidad, y se plantea, en relación con ambos conceptos, la necesidad de definir una nueva función termodinámica que permita predecir el sentido natural de evolución de los sistemas termodinámicos.

Numerosos investigadores advierten de que algunas de las dificultades de aprendizaje más extendidas y persistentes en el campo de la Termodinámica se relacionan con ideas alternativas sobre la reversibilidad y la espontaneidad (Johnstone *et al.*, 1977; Thomas y Schwenz, 1998; Mirone y Benedetti, 2001). La investigación educativa ha comprobado que los alumnos tienden a establecer identificaciones, paralelismos y relaciones alternativas entre estos dos conceptos termodinámicos y algunas nociones cinéticas o de equilibrio. En particular, muchos estudiantes reconocen en la *lentitud* (baja velocidad) de una reacción química un criterio de reversibilidad de la reacción (Johnstone *et al.*, 1977); en ocasiones, algunos alumnos llegan a describir la reversibilidad en términos de equilibrio químico (Thomas y Schwenz, 1998).

Nuevamente recomendamos, para superar estas ideas alternativas, relacionar los conceptos de reversibilidad y espontaneidad con los estados del sistema y con los cambios de estado que los sistemas experimentan durante los procesos termodinámicos.

Se incidirá en el hecho de que todas las transformaciones naturales tienden hacia el equilibrio con una velocidad finita; su irreversibilidad se explica como consecuencia de

ciertos desequilibrios finitos, debidos a fenómenos tales como la fricción, la ausencia de un equilibrio térmico preciso, la turbulencia, la mezcla irreversible… La contribución de estos fenómenos es la responsable de que no exista ninguna transformación termodinámica natural reversible, mediante la cual el sistema no tienda a evolucionar en ningún sentido. No obstante, pueden considerarse reversibles aquellos procesos naturales que verifican que el tiempo necesario para el cambio de estado tiende a infinito.

Tabla 30: Guion de la actividad Fi02 – (ir)reversibilidad

Actividad *Fi02*: (ir)reversibilidad

En nuestra experiencia cotidiana vemos que los fenómenos naturales ocurren siempre solamente en un sentido y nunca en el contrario. Por ejemplo, si dejamos caer un huevo desde cierta altura, éste se romperá al estrellarse contra el suelo. Nunca observaremos el proceso inverso, esto es, que el huevo roto se recomponga espontáneamente y ascienda desde el suelo hasta nuestra mano… ¿Por qué se produce solamente uno de los dos procesos, si ambos cumplen el primer principio de la Termodinámica? Como ves, el primer principio no nos aporta ninguna información sobre el sentido en que transcurren los procesos.

Hasta mediados del siglo XIX, se aceptaba que los sistemas tendían a evolucionar hacia estados de energía mínima. Sin embargo, como ya sabes, muchos procesos endotérmicos suceden espontáneamente. Es evidente, por tanto, que el concepto de entalpía tampoco nos ayuda a predecir el sentido de evolución de los sistemas.

Se define un proceso termodinámico reversible como aquél mediante el cual el sistema evoluciona a través de estados de equilibrio o muy cercanos al equilibrio. En un proceso reversible, un cambio infinitesimal en las variables termodinámicas puede hacer que estos estados intermedios sean recorridos en sentido contrario, y el sistema evolucione hacia su estado inicial. Un proceso es termodinámicamente irreversible cuando la sucesión de estados intermedios de no-equilibrio no puede ser recorrida en el sentido contrario al que sucede cambiando infinitesimalmente las condiciones del sistema. Esto no significa que el sistema no pueda volver a su estado inicial, sino simplemente que la sucesión de estados de no-equilibrio intermedios no puede ser recorrida en cualquiera de los dos sentidos salvo que recurramos a cambios no infinitesimales.

Los procesos termodinámicos reversibles no dejan de ser una idealización, porque en la Naturaleza no existe ninguna transformación reversible: los sistemas naturales siempre tienden a evolucionar en algún sentido, y los desequilibrios que se producen en los sistemas no son infinitesimales. Eso sí, algunos procesos reales pueden considerarse prácticamente reversibles, si tiende a infinito el tiempo necesario para que tenga lugar el proceso; pero esta condición es puramente cinética, y no puede estudiarse desde el punto de vista termodinámico. La Termodinámica no nos informa de la velocidad a la que suceden las transformaciones de los sistemas.

En resumen: ninguno de los conceptos termodinámicos ni de los Principios termodinámicos que conocemos puede aportarnos información sobre la evolución de los sistemas químicos. ¿Cómo saber, entonces, si una reacción va a suceder o no? Para poder predecirlo recurriremos al segundo principio de la Termodinámica, que nos presenta una nueva variable termodinámica muy útil en Química: la entropía.

A continuación, mediante la actividad de reestructuración *Fi03*, se insiste en los conceptos de irreversibilidad y espontaneidad. Estos conceptos se relacionan con el

enunciado de Kelvin-Planck para el segundo principio de la Termodinámica, mediante el cual se definirá la variable entropía.

Actividad Fi03: la entropía y el segundo principio de la Termodinámica

Esta actividad de reestructuración comienza con el planteamiento del segundo principio de la Termodinámica, tal como fue enunciado por Kelvin y Planck:

Tabla 31: Guion de la actividad Fi03 – la entropía y el segundo principio de la Termodinámica

Actividad *Fi*03: la entropía y el segundo principio de la Termodinámica

Según nuestra experiencia, nunca se ha observado que una máquina que funcione cíclicamente absorba una determinada cantidad energía del entorno (por el proceso calor) y la transfiera completamente por el proceso trabajo. O, lo que es lo mismo: todo proceso termodinámico tiene un rendimiento límite para transferir al entorno (ceder) por trabajo la misma cantidad de energía que ha absorbido (transferido desde el entorno) por calor.

Esta es la base del segundo principio de la Termodinámica.

Al igual que sucede con el primer principio de la Termodinámica, existen varios enunciados del segundo principio. El más conocido de ellos es el de Kelvin-Planck:

"Es imposible construir una máquina térmica que, operando cíclicamente, no produzca más efecto que la absorción de calor de un foco calorífico y la realización, por parte del sistema, de una cantidad equivalente de trabajo sobre el entorno."

Pero, ¿cómo debe transferirse la energía en los sistemas?

Clausius estudió cómo variaban las transferencias de energía por calor en un sistema sencillo e ideal: un sistema aislado que experimenta un proceso reversible (en concreto, en el que la temperatura varía infinitesimalmente).

Clausius observó que la cantidad de energía transferida por calor, al variar infinitesimalmente la temperatura, es diferente para un sistema que tienda a no evolucionar, y para el mismo sistema si éste tiende a evolucionar en algún sentido. Esta diferencia se relaciona con la irreversibilidad de los procesos naturales: en un proceso termodinámico irreversible, una mínima variación de las condiciones (dT) produce una transferencia de energía neta ($dq \neq 0$). Esta idea puede simbolizarse mediante el cociente $dq_{reversible}/dT$. Así:

Según el Teorema de Clausius, para un sistema aislado en el que tenga lugar un proceso reversible se cumple que:

$$dq_{reversible}/dT = 0$$

siendo $dq_{reversible}/dT$ la cantidad infinitesimal de energía que el sistema transfiere, de forma reversible, a la temperatura T. Si el proceso es irreversible, se cumple que:

$$dq_{reversible}/dT > 0$$

Esta idea animó a Clausius a definir una nueva función de estado del sistema, cuya variación fuese igual a este cociente. Utilizando esta nueva función de estado, podría saberse si un sistema evoluciona mediante un proceso termodinámico (el cociente dq/dT aumenta), o si el sistema permanece en el mismo estado (el cociente dq/dT no varía).

Esta nueva función es la entropía (S). Se trata de una función de estado extensiva, puesto que su valor depende de las transferencias de energía del

sistema, que dependen de la cantidad de partículas del sistema. Como su variación (ΔS) se relaciona con las transformaciones de los sistemas termodinámicos aislados, la evolución de la entropía de un sistema aislado nos ofrece un criterio para conocer la evolución del sistema:

$\Delta S \geq 0$ (desigualdad de Clausius)

Será espontáneo (sucederá sin intervención externa) todo proceso termodinámico que verifique la desigualdad de Clausius; eso sí, en un sistema aislado.

Si consideramos el Universo un sistema aislado, podemos formular que $\Delta S_{universo} \geq 0$ en cualquier proceso. Como todas las transformaciones que ocurren en el Universo son irreversibles, realmente serán espontáneas solamente aquellas que cumplan $\Delta S_{universo} > 0$. La entropía del universo aumentará siempre que en él ocurra algún proceso.

¿Cómo se puede predecir la evolución de los sistemas no aislados? La variación de entropía del sistema no sirve en este caso como criterio de espontaneidad, salvo que conozcamos la variación de entropía del entorno (sistema y entorno hacen el universo, que sí es un sistema aislado). Por ello:

Si queremos conocer la variación de entropía en cualquier sistema, aislado o no, la referiremos a la variación de entropía del Universo (que suponemos aislado):

Los procesos espontáneos verifican: $\Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{entorno} > 0$

Los procesos (irreversibles) ocurrirán en el sistema hasta que la entropía alcance su máximo valor posible y, cuando $\Delta S_{universo}$ llegue a su valor máximo, toda transformación a nivel macroscópico se detendrá, porque a partir de este punto cualquier proceso sólo podría disminuir la entropía.

Basándonos en esta idea podemos afirmar que el equilibrio termodinámico en un sistema aislado se alcanza cuando la entropía del sistema alcanza su valor máximo.

Esta decisión obedece a dos motivos: en primer lugar, se pretende que los estudiantes conozcan y valoren la variable entropía tal como la definió Clausius; en segundo lugar, y puesto que durante el desarrollo de la actividad *Fi03* ya se habrán trabajado 17 actividades sobre las variables termodinámicas y sus variaciones, la introducción de un símbolo matemático del cálculo diferencial, ya tratado en las materias de Matemáticas, no representará un obstáculo a la comprensión conceptual, que por además en estas propuestas didácticas siempre se desarrolla sobre la base de lo procedimental y los modelos interpretativos de la química macroscópica. En el caso de la entropía, su introducción se justifica por la necesidad de analizar las transferencias por calor sucedidas en un sistema que evoluciona a temperatura constante, lo que introduce la definición de Clausius (con su correspondiente representación matemática); pero la definición de entropía no se desarrolla mediante esta ecuación algebraica, sino sobre los conceptos de calor, variación de temperatura, desorden termodinámico, movimiento de las partículas e interacciones entre partículas (enlaces químicos e interacciones débiles).

Debido a la complejidad de las ideas que se desarrollan en esta actividad, para su desarrollo en el aula se proponen las siguientes indicaciones:

En primer lugar, se pedirá a los alumnos que lean la actividad y, acto seguido, realicen una puesta en común, en pequeño grupo, para negociar el significado de las ideas que se desarrollan en el texto.

Después de que los alumnos hayan consensuado sus ideas, se comenzarán a analizar en gran grupo los conceptos y enunciados que se pretenden reestructurar e integrar en esta actividad.

Mediante esta estrategia se pretende que el docente explore las ideas de los estudiantes sobre la evolución de los sistemas termodinámicos; al dar oportunidad al alumnado para aclarar y comentar en voz alta sus ideas, se pondrá de manifiesto la necesidad de negociar significados y de construir un lenguaje útil para comunicar las ideas científicas. Frente la ambigüedad y la polisemia del lenguaje cotidiano, el lenguaje científico se demuestra como una herramienta eficiente en la construcción y en el consenso de significados.

La actividad comienza presentando a los alumnos el segundo principio de la Termodinámica a través del enunciado de Kelvin-Planck, que se relaciona de manera inmediata con la experiencia cotidiana. El análisis que se pretende desarrollar en el aula se resume como sigue:

El sistema termodinámico propuesto en el enunciado de Kelvin-Planck es una máquina que funciona cíclicamente. Esto es, un sistema abierto que evoluciona mediante una serie de etapas que conforman un camino termodinámico cíclico, a lo largo del cual la variación de cualquier función de estado es nula.

Las transferencias de energía que se producen a lo largo del ciclo termodinámico se consideran "controladas", en virtud del primer principio de la Termodinámica: la variación total de energía, a lo largo del ciclo, es cero.

En una determinada etapa del ciclo, se produce una transferencia de energía desde el entorno hacia el sistema por el proceso calor, a una temperatura dada. Desde la perspectiva del primer principio, podría suceder que a continuación el sistema transfiriese la misma cantidad de energía al entorno por cualquier proceso (calor, trabajo de expansión, trabajo eléctrico…) Sin embargo, nunca se verifica que el sistema transfiera al entorno toda la energía absorbida mediante un proceso de trabajo macroscópico: buena parte de esta energía se transfiere por calor (trabajo microscópico). Esta "transferencia residual" o "no útil" se manifiesta como un aumento de energía del sistema (máquina).

Esta idea permite introducir una nueva dimensión microscópica al concepto de "rendimiento" de las máquinas térmicas (ya tratado en *Fp04*): parte de la energía absorbida se "dispersa" en transferencias por calor, como consecuencia de choques entre las partículas del sistema. Esta perspectiva microscópica amplía la información que ofrece el primer principio sobre los procesos: la energía se conserva en los procesos, y además parte de ella siempre se invierte en interacciones entre partículas.

Esta idea se aplicará en la actividad *Fi04*, que plantea a los alumnos el problema del móvil perpetuo de segunda especie.

En el material que se facilita a los alumnos para el desarrollo de la actividad *Fi03* no se ha incluido ningún razonamiento microscópico; ello se debe a que la información contenida en el texto es meramente termodinámica y, por tanto, macroscópica. A fin de que los estudiantes movilicen esta información y la conviertan en conocimiento, se les animará a complementarla con las relaciones microscópicas que construyen en el aula; se pretende con ello que los alumnos sean conscientes del carácter macroscópico de la Termodinámica, y de la necesidad de integrar los tres dominios de conocimiento para ampliar la capacidad descriptiva, interpretativa y predictiva del conocimiento.

Al comienzo de la actividad, se presentó a los alumnos el problema de las transferencias de energía en una máquina cíclica; se construyó una interpretación microscópica para el enunciado de Kelvin-Planck, y se concluyó que buena parte de la energía transferida desde el entorno hacia el sistema se disipa por calor. En este momento de la intervención, se pretende analizar esta disipación inevitable. Para ello, se estudiarán las transferencias de energía que tienen lugar en un sistema más sencillo: un sistema aislado que experimenta un proceso termodinámico. De esta manera se construirá la noción de entropía integrando las perspectivas macroscópica (en términos de transferencias de energía en el sistema aislado) y microscópica (sobre la base del modelo de partículas). De nuevo, las relaciones incluidas en el texto de la actividad son macroscópicas (termodinámicas); la explicación microscópica se construye en el aula mediante la puesta en común de las ideas del alumnado y con la guía del profesor.

Se presentará en primer lugar el problema al que se pretende enfrentar el alumnado: conocer cómo son las transferencias de energía por calor en un sistema aislado que experimenta un proceso termodinámico.

Varios de los problemas de aprendizaje más comunes en el campo de la Termodinámica se relacionan con la dificultad de analizar las transferencias energéticas entre el sistema y los alrededores (Johnstone *et al.*, 1977; Mirone y Benedetti, 2001; Carson y Watson, 2002; Greenbowe y Meltzer, 2003; Sözbilir y Bennett, 2007). Para solucionar en lo posible este problema, se relacionará el conocimiento ya construido por los alumnos con el conocimiento que se pretende promover:

Se comenzará por el control de variables; dado que las transferencias de energía que interesan en este caso son las realizadas por el proceso calor, la variable de mayor interés es la temperatura del sistema. Las transferencias de energía por calor dependen de las variaciones de la temperatura del sistema a lo largo del proceso.

En concreto, los principales resultados de Clausius se refieren a dos procesos termodinámicos diferentes, realizados sobre sistemas idénticos: un proceso reversible, y un proceso irreversible. En un proceso reversible, la temperatura variará de forma infinitesimal a lo largo de la sucesión de estados de equilibrio o de *quasi*-equilibrio que

experimentará el sistema; en un proceso irreversible, la temperatura variará de forma finita y no homogénea entre los diferentes estados termodinámicos del sistema.

En un proceso reversible, la cantidad neta de energía transferida por calor es cero; o, lo que es lo mismo, si el sistema tiende a no evolucionar, y una mínima variación de la temperatura tiene como consecuencia una transferencia de energía nula. En un proceso irreversible, mediante el cual el sistema tiende a evolucionar en algún sentido, una mínima variación de la temperatura sí produce una transferencia de energía neta distinta de cero.

Los resultados de Clausius para el problema propuesto se pueden expresar mediante la simbología formal (matemática) en el valor del cociente dq/dT, siendo q el calor involucrado en el proceso termodinámico, y T la temperatura. Es posible que los alumnos encuentren dificultades para comprender la simbología, que incluye el concepto matemático de derivación.

Dado que la relación entre estas transferencias de energía y la variación de la temperatura es diferente si el sistema aislado tiende a evolucionar (proceso irreversible, real) o si tiende a no evolucionar (proceso reversible), su valor puede servir como indicador de la viabilidad termodinámica (espontaneidad) del proceso. La entropía surge entonces como una nueva función de estado cuya variación representa, para el caso de los sistemas aislados, las inevitables transferencias de energía por calor, en función de la variación de temperatura, durante un proceso termodinámico viable (espontáneo). Esta introducción de la entropía dota a la variable de un significado macroscópico, y presenta la variación de la entropía como criterio para conocer la evolución del sistema.

Aunque no es objetivo de esta actividad construir un significado microscópico completo para la entropía, se enfatizará en el carácter extensivo de esta nueva función de estado, a través del modelo de partículas:

La entropía compendia, en función de las variaciones de temperatura, el resultado de las transferencias de energía por el proceso calor. El calor es un proceso que involucra choques entre las partículas del sistema. Dado que el número de partículas de un sistema material depende de la masa del sistema (si consideramos controlada la variable composición), la entropía es una variable extensiva. La relación que existe entre la entropía de un sistema y la composición química del mismo se desarrollará en *Fi06*.

Presentada la Desigualdad de Clausius como criterio para conocer la evolución de los sistemas aislados, se hace evidente el gran inconveniente del criterio entrópico de espontaneidad: precisamente por basarse en las transferencias de energía, este criterio es válido solamente para los sistemas aislados. En Química, prácticamente todos los sistemas reaccionantes son cerrados, *no aislados*; para poder aplicar el criterio entrópico de espontaneidad no se puede recurrir a la variación de entropía del sistema, sino que se debe conocer también la variación de entropía del entorno. Esto no siempre es posible y, desde luego, no es deseable, si se dispone de un criterio de espontaneidad referido

únicamente al sistema. Este criterio, la energía de Gibbs, se desarrollará en la actividad de exploración *Fi08*, y en las de reestructuración *Fi09* y *Fi10*. La variación de entropía de un sistema no aislado que experimenta un proceso espontáneo puede ser negativa, siempre y cuando la variación de entropía del Universo (sistema que se supone aislado) sea positiva.

Partiendo de la valoración de ΔS como criterio de espontaneidad, se presentará la variación de entropía como un criterio de equilibrio termodinámico para los sistemas aislados: si la entropía de un sistema aislado crece cuando el proceso es espontáneo, el sistema alcanzará su valor máximo de entropía cuando el proceso deje de ser espontáneo; en este momento en que el proceso se detiene, se considera que el sistema ha llegado a un estado de equilibrio. Se enfatizará que el hecho de que se detenga el proceso, de que se alcance el equilibrio, no significa que el sistema permanezca en un "estado estático", sino que a nivel macroscópico no se verifica ningún cambio en el estado del sistema. Cualquier cambio macroscópico implicaría una disminución de la entropía (máxima) del sistema aislado. El estado de equilibrio termodinámico puede definirse, pues, como el estado del sistema (aislado) en el que la entropía alcanza su valor máximo.

Una vez construida una perspectiva macroscópica (termodinámica) de la entropía, mediante la actividad *Fi04* se pretende el alumno aplique y reestructure las ideas trabajadas a lo largo de las tres primeras actividades de la secuencia. Posteriormente, en la actividad *Fp05*, se construirá una perspectiva microscópica para el concepto de entropía, en relación con el desorden termodinámico.

Actividad Fi04: el móvil perpetuo de segunda especie

Mediante esta actividad de aplicación, se pretende que los alumnos transfieran sus conocimientos a la resolución de un problema concreto: la posibilidad de que exista el móvil perpetuo de segunda especie. Este problema se plantea a través de una situación en la que se propone a los alumnos una máquina cuyo funcionamiento, en total acuerdo con el primer principio, incumple el segundo principio:

Esta actividad constituye, en cierto modo, una continuación de la actividad *Fp04* de la secuencia *Termoquímica*, en la que se enfrentó a los alumnos a la interpretación termodinámica del funcionamiento de un motor de explosión y a la imposibilidad de existencia del móvil perpetuo de primera especie. La intención educativa es que los alumnos construyan un razonamiento explicativo con el que, sobre la base del primer y del segundo principio, den respuesta a un problema de importancia histórica para la comunidad científica.

Se relacionan a continuación los conocimientos que los estudiantes han de movilizar en la elaboración de un razonamiento explicativo acorde con las ideas de la ciencia escolar:

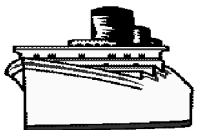
Sobre el primer principio de la Termodinámica: la conservación de la energía y la naturaleza de las transferencias de energía (calor y trabajo).

Sobre el segundo principio: el "rendimiento térmico" de las transferencias de energía, relacionado con la naturaleza material del sistema (modelo de partículas).

Tabla 32: Guion de la actividad Fi04 – el móvil perpetuo de segunda especie

Actividad *Fi04*: el móvil perpetuo de segunda especie

Imagina que eres director de proyectos en una compañía náutica. Un día llega a tu despacho un diseñador, y te presenta un proyecto prometedor:



Ha diseñado un trasatlántico que, gracias a una pequeña batería, es capaz de captar agua del océano. Un sistema de turbinas transfiere la energía cinética del agua captada, con lo que obtiene electricidad. Luego, esta agua se devuelve al océano mediante un sistema de sumideros. La electricidad generada por las turbinas abastece todas las necesidades del barco, incluida la "captación" de más agua del mar. Por ello, no se necesita ningún motor adicional, y el trasatlántico puede funcionar continuamente sin necesidad de volver a puerto para repostar.

A. ¿Qué opinas de este proyecto? Justifica tu respuesta.

B. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Se presenta a los alumnos un dispositivo ingenieril gracias al cual un barco podría navegar indefinidamente sin necesidad de motores de combustión. El dispositivo que se propone realiza un ciclo termodinámico acorde con el primer principio de la Termodinámica.

Las ideas clave que se pretenden tratar en esta actividad son las siguientes:

A diferencia de cómo se planteó la actividad *Fp04* de la secuencia *Termoquímica*, en este caso no se propone directamente a los alumnos reflexionar sobre el funcionamiento del dispositivo ingenieril a partir del ciclo termodinámico en que se basa. Se trata de que los alumnos, por sí solos, identifiquen el dispositivo propuesto como un sistema termodinámico que experimenta un proceso cíclico, a lo largo del cual la variación de cualquier función de estado es nula. El sistema, abierto, interacciona mediante transferencias de materia (agua) y energía (calor, trabajo mecánico, trabajo eléctrico).

El análisis del ciclo termodinámico es sencillo, y en cierto sentido análogo al del ciclo presentado en la actividad *Fp04* de la secuencia *Termoquímica*. En el momento de zarpar, el barco puede transferir una determinada cantidad de energía desde una batería. Esta energía se invierte en captar materia del entorno (agua en movimiento), con lo cual recibe energía cinética del agua. Mediante un sistema de turbinas, la energía cinética se transfiere por un proceso de trabajo eléctrico. La cantidad de energía así transferida "realiza un trabajo útil", puesto que se transferirá para desplazar el barco, hacer funcionar todos los dispositivos eléctricos a bordo, y captar más energía cinética del agua; el ciclo termodinámico se completa con la devolución del agua al mar (transferencia de materia desde el sistema hacia el entorno).

En el texto escrito de esta actividad no se incluye ninguna referencia a las transferencias de energía por calor.

Con esta descripción del ciclo termodinámico, se desarrollarán las ideas relativas al primer principio y al segundo principio de la Termodinámica:

En primer lugar, el alumnado ha de transferir sus conocimientos sobre la conservación de la energía mecánica. Identificadas las transferencias de energía que el dispositivo establece con el entorno, y dado que el proceso termodinámico es cíclico, el primer principio establece que la cantidad de energía transferida hacia el sistema debe ser igual a la transferida desde el sistema.

Este dispositivo, perfectamente coherente con el primer principio de la Termodinámica, incumple el segundo principio, puesto que supone una transferencia de energía 100% útil desde el sistema hacia el entorno.

En la descripción de la actividad *Fp04* de la secuencia *Termoquímica* se avanzó que cualquier máquina, por eficiente que sea, presenta siempre un rendimiento máximo inferior al 100%. Esta limitación se debe a la propia naturaleza material de la máquina: a nivel atómico-molecular, en el sistema tienen lugar transferencias de energía por el proceso de calor (trabajo microscópico), con lo cual parte de la energía implicada en el proceso se ve invertida en aumentar la energía cinética de las partículas. Este fenómeno microscópico se manifiesta a nivel macroscópico como un aumento en la temperatura del sistema.

La inferencia inmediata que se extrae de este razonamiento es la imposibilidad de que exista el dispositivo planteado, que constituye un ejemplo de móvil perpetuo de segunda especie. Si parte de la energía que el dispositivo recibe del entorno se invierte en procesos de transferencia no útil, el rendimiento máximo del dispositivo es inferior al 100%, y el barco acabaría por detenerse.

Esta idea, desarrollada a partir de un razonamiento microscópico sencillo, se puede generalizar a nivel macroscópico como una incompatibilidad con lo establecido en el segundo principio de la Termodinámica. Este Principio expresa una limitación para la "conversión de calor en trabajo", o lo que es lo mismo, una eficiencia inferior al 100% en la conversión de energía a nivel macroscópico.

Puede introducirse la relación entre esta transferencia inevitable de energía y la entropía: cualquier proceso termodinámico espontáneo, como el que se presenta en la actividad, sucede mientras aumente la entropía del universo (sistema abierto y su entorno). Ello implica la realización de transferencias de energía por calor en el conjunto sistema-entorno, y estas transferencias pueden simbolizarse como una cuota entrópica, que mantiene al proceso en marcha y aumenta la entropía del universo. En el momento en que la cuota entrópica no puede satisfacerse por falta de energía que transferir, la entropía del universo asciende a su valor máximo, y se alcanza el estado de equilibrio (el universo

tiende a no evolucionar). Pero, dado que el sistema objeto de estudio es no aislado, para aplicar el criterio entrópico ha de atenderse a la maximización de la entropía del universo, lo cual implica conocer el entorno.

Partiendo de la idea de que el dispositivo propuesto vulnera el segundo principio, se introducirá el principio de degradación de la energía como una consecuencia directa del segundo principio. El principio de degradación de la energía manifiesta que todo proceso termodinámico implica una degradación de la energía, en el sentido de que supone convertir una fracción de la energía del Universo en energía inútil, no manifestable en la realización de trabajo macroscópico.

Según este principio, no es posible explotar con un 100% de rendimiento ningún recurso energético de nuestro planeta; y el rendimiento que podemos obtener de los recursos es cada vez menor. Esta idea permitirá organizar un debate en gran grupo sobre el agotamiento de los recursos energéticos actuales y la necesidad de su aprovechamiento y ahorro. Se recomienda introducir en el debate ideas relacionadas con la búsqueda de alternativas energéticas para sustituir los recursos energéticos actuales por otros más sostenibles, más limpios (al menos, de menor repercusión negativa sobre el medio ambiente), y más eficaces en cuanto a su rendimiento termodinámico. Los conceptos de transferencia energética (calor, trabajo) se integrarán en este debate con los de irreversibilidad, espontaneidad y equilibrio, en relación con el concepto entropía. Los objetivos principales del debate son ayudar a los alumnos a adquirir una valoración crítica de las actividades científica e industrial, y promover el desarrollo de actitudes individuales de responsabilidad en la gestión de los recursos energéticos, desde la perspectiva del compromiso con el bienestar de la sociedad y con la conservación del medio ambiente.

Actividad Fi05: entropía, desorden y probabilidad de los estados

Con esta actividad de reestructuración, se facilita a los alumnos nueva información que les ayudará a construir una interpretación microscópica para el concepto de entropía. La introducción de nociones relacionadas con la Termodinámica Estadística integrará los aspectos corpusculares de los sistemas en una perspectiva termodinámica actualizada.

Por otra parte, la actividad puede finalizar con un pequeño debate, en gran grupo, sobre la controvertida hipótesis de la *muerte térmica del Universo*.

La intención educativa de esta actividad es ayudar al alumnado a desarrollar una perspectiva microscópica para interpretar el concepto de entropía como estimador del desorden termodinámico de un sistema. A partir de la relación entre la entropía y el desorden, se desarrollarán las dos principales consecuencias del segundo principio de la Termodinámica: la elaboración de la escala absoluta de temperaturas, y el enunciado del principio de degradación de la energía. Partiendo de éste se discutirá la hipótesis de la muerte térmica del Universo.

Tabla 33: Guion de la actividad Fi05 – entropía, desorden y probabilidad de los estados

Actividad *Fi05*: entropía, desorden y probabilidad de los estados

Ya hemos hablado de que, en la Naturaleza, los procesos ocurren espontáneamente en un determinado sentido.

Pero, además, se observa que los sistemas tienden a evolucionar hacia estados más probables. Pensemos, por ejemplo, en un gas encerrado en un recipiente: las moléculas de gas podrían moverse en cualquier dirección. Por ejemplo, podrían tender a agruparse en el fondo del recipiente… Sin embargo, se observa que siempre tenderán a ocupar todo el espacio disponible.

La experiencia nos dice que los estados termodinámicos desordenados son más probables que los estados ordenados; pero cuando hablamos de desorden termodinámico, no nos referimos únicamente al "desorden espacial de las partículas", sino al "desorden energético de las partículas". Por ejemplo, será poco probable que en el recipiente todas las moléculas de gas tengan la misma energía. La energía de las partículas determina su movimiento y, por tanto, su desorden espacial. Para referirnos a esta idea de desorden energético/espacial utilizaremos el término desorden termodinámico del sistema.

A finales del siglo XIX, Boltzmann descubrió una importante relación entre la entropía y la probabilidad de los estados termodinámicos. Según Boltzmann, la entropía de un sistema es función de la probabilidad p del estado termodinámico del sistema:

$S = k \cdot \ln p$ donde $k = R/N_{Avogadro}$ es la constante de Boltzmann.

Los resultados de Boltzmann nos permiten afirmar que la entropía de un sistema ofrece una medida del grado de desorden termodinámico (espacial y energético) de sus partículas.

Así, el aumento de S en un sistema aislado que evoluciona hacia el equilibrio se relaciona con la tendencia hacia el estado más probable. En concreto, los sistemas tienden a evolucionar hasta que alcanzan el estado de equilibrio termodinámico, que tiene el valor de S máximo. Podemos decir, pues, que la distribución de la energía del sistema es la que determina en qué dirección un proceso es espontáneo.

Las investigaciones de Boltzmann (y muchas investigaciones posteriores) relacionan la entropía, concepto termodinámico, con el concepto de probabilidad, meramente estadístico. Por ello, tenemos que puntualizar que no es imposible que un sistema aislado evolucione hacia un estado de menor probabilidad; simplemente, es poco probable.

Así pues, el segundo principio es un principio cuyo incumplimiento es altamente improbable a escala macroscópica (esto es, si disponemos de una "buena muestra", constituida por un gran número de partículas).

Este segundo principio tiene dos importantes consecuencias:

En primer lugar, al relacionar la entropía con la distribución energética de las partículas de los sistemas, proporciona una base para definir una escala absoluta de temperaturas (independiente de las propiedades de las sustancias). Kelvin se basó en el segundo principio para establecer la escala Kelvin, también llamada escala absoluta o termodinámica de temperaturas. El cero de la escala absoluta (0 K) se fija en las condiciones en las que la energía de las partículas es la mínima posible: -273,15 °C.

Otra importante consecuencia del segundo principio de la Termodinámica es el principio de la degradación de la energía. Si, como afirma el segundo principio, todo proceso termodinámico implica una cantidad de energía inutilizable para su conversión en trabajo, entonces una parte de la energía aportada al sistema se podrá considerar no aprovechable.

> Si el segundo principio fuese aplicable al Universo en su totalidad, la entropía del Universo crecería sin cesar mientras éste se halle en evolución, y cada vez más energía se convertiría en energía inútil. Cuando la entropía del Universo alcanzase su valor máximo, se llegaría al equilibrio, momento en que se produciría la muerte térmica del Universo, o total carencia de energía disponible para realizar trabajo útil. En ese momento todos los procesos, incluida la vida, se detendrían.
>
> Hoy en día, las antiguas especulaciones filosóficas basadas en esta supuesta "muerte térmica" no están admitidas en la comunidad científica más que como hipótesis, puesto que las observaciones termodinámicas actuales se han realizado sobre objetos de tamaño muy inferior al astronómico, y no existe garantía de que los resultados sean extrapolables a todo el Universo.

Se enumeran a continuación las ideas que se pretenden desarrollar:

En primer lugar, se relaciona la espontaneidad de los procesos termodinámicos con la probabilidad de los estados termodinámicos. Esta relación se establece a través de un ejemplo basado en un sencillo modelo de partículas para un gas ideal:

Se considerará que un gas ideal se halla encerrado en un recipiente adiabático a una temperatura dada; por ejemplo, a temperatura ambiente. Dado que el recipiente es adiabático, el sistema se puede categorizar como aislado. Según el modelo de partículas, cada una de las partículas de gas ideal se mueve en una dirección y en un sentido determinado, hasta que colisiona con otra partícula de gas o con las paredes del recipiente; entonces, como consecuencia del choque, las partículas de gas afectadas cambian de velocidad (en cuanto a rapidez y en cuanto a dirección), y continúan su movimiento.

El propio modelo de partículas permite introducir un modelo de probabilidad para las partículas del gas encerradas en el recipiente:

Supondremos que, en principio, el recipiente está vacío de partículas, y las partículas de este gas ideal se introducen en el recipiente (por ejemplo, por inyección a través de un septum). Se observará entonces que las partículas tienden a ocupar todo el volumen disponible en el recipiente. Esto no significa que, en un momento dado, las partículas no puedan adoptar cualquier distribución espacial que las agrupe en un pequeño espacio; simplemente, se observa que, durante la mayor parte del tiempo, las partículas adoptan disposiciones espaciales que suponen la práctica ocupación de todo el espacio disponible en el recipiente.

Todas y cada una de las partículas de gas tienen una determinada energía, que se manifiesta en sus movimientos translacional, rotacional y vibracional, en las interacciones electrostáticas entre las partículas… Si consideramos que las partículas de gas ideal no establecen interacciones electrostáticas, la manifestación más "observable" de la energía de las partículas es la relacionada con su agitación térmica, que se ve afectada por los choques de las partículas entre sí y contra las paredes del recipiente. De este modo, se puede relacionar las distribuciones "espacial" y "energética" de las partículas: la

distribución energética de las partículas determina la distribución espacial de las mismas. Así, podrá considerarse la probabilidad de una determinada distribución energética / espacial media, teniendo en cuenta que la distribución espacial es una contribución muy visible de la distribución energética total.

No cabe duda de que la entropía es el concepto termodinámico que más publicaciones ha centrado en la literatura científica, tanto por la discusión epistémica que ha generado en la propia comunidad científica, como por el extraordinario repertorio de ideas alternativas y dificultades de aprendizaje que se han puesto de manifiesto en relación con este concepto. Y, particularmente, la idea alternativa más extendida acerca de la entropía es la identificación de ésta con una idea de desorden que no sólo se aleja de la deseable desde la ciencia escolar, sino que, además, varía considerablemente de unos alumnos a otros (Ribeiro, 1992) y presenta una extraordinaria resistencia al cambio conceptual.

Las numerosas ideas alternativas documentadas sobre el desorden termodinámico abarcan una gran cantidad de significados y connotaciones implícitas entre las cuales podemos destacar el caos, la aleatoriedad (*randomness*), o la inestabilidad (*instability*). No obstante, entre tal diversidad de significados que los alumnos atribuyen al concepto que denominan desorden, ninguno de ellos alude al desorden termodinámico, sino que todos ellos se refieren a un desorden meramente visual (Johnstone *et al.*, 1977; Ribeiro, 1992; Abraham *et al.*, 1992; Selepe y Bradley, 1997; Sözbilir, 2001; Sözbilir y Bennett, 2007).

La idea de desorden termodinámico que se pretende construir en esta actividad va más allá del desorden espacial de las partículas, puesto que implica la distribución de las partículas del sistema entre la serie de niveles de energía disponibles para el sistema en las condiciones consideradas. Mediante esta idea de desorden termodinámico en términos de accesibilidad a los diferentes microestados de energía se pretende superar una de las ideas alternativas sin duda más extendidas y persistentes entre el alumnado: la identificación de la entropía con el desorden espacial de las partículas. Esta noción de desorden termodinámico incluye el desorden espacial de las partículas como una manifestación más del desorden energético total.

Es posible que esta noción de desorden termodinámico resulte demasiado compleja para los alumnos, o, cuando menos, difícil de desarrollar en una temporalización acorde con las exigencias que impone el calendario de las PAAU. Por ello, si esta idea excede las posibilidades o los objetivos marcados, se recomienda incidir en una noción de desorden termodinámico más simple, en la cual no se haga referencia a los microestados de energía, sino a la distribución de energía de las partículas en relación a los niveles de energía disponibles para el sistema (translacionales, vibracionales y rotacionales). Esta idea, más sencilla, permitirá relacionar la entropía con la temperatura y con dispersión de la energía en el sistema a través del modelo de partículas (choques entre las partículas del sistema).

Al analizar termodinámicamente el proceso descrito para este sistema, se evidencia la relación entre el concepto termodinámico de espontaneidad del proceso y el concepto estadístico de probabilidad de los estados por los que el sistema pasa durante el proceso:

En el proceso termodinámico de interés, el sistema evoluciona desde un estado inicial, en el que las partículas se introducen en el recipiente, hasta un estado final de equilibrio, que se considerará alcanzado cuando en el sistema no se observen cambios a nivel macroscópico. En el sistema, las partículas tienden a repartir la energía al cabo de un cierto tiempo, a medida que se producen más choques entre ellas; el estado de equilibrio se verifica como el estado en el cual la energía se distribuye atendiendo a un número infinito de choques entre partículas. En el estado de equilibrio, las partículas adoptan la distribución energética media más probable.

Sobre la base de esta relación entre la espontaneidad de los procesos y la probabilidad de los estados termodinámicos, se introducirá la definición de entropía de Boltzmann, que asocia el valor de la entropía de un sistema con la probabilidad de que el sistema se encuentre en un estado determinado. En la actividad *Fi03* se desarrolló la idea de que el estado de equilibrio es el estado en el que la entropía del sistema es máxima (para sistemas aislados). Esta idea se complementa ahora con el resultado de las investigaciones de Boltzmann: el estado en el que la entropía del sistema es máxima es el estado más probable. De aquí se infiere que el estado de equilibrio es el estado más probable para los sistemas, el estado que tienden a alcanzar en su evolución. La entropía cobra valor como variable de estado indicativa del desorden termodinámico.

Se describirá el estado de equilibrio como un estado "invariable" a nivel macroscópico, pero dinámico a nivel microscópico, y caracterizado por una distribución energética/espacial media desordenada para las partículas del sistema.

De la idea anterior se deriva directamente la siguiente: los sistemas (aislados) tienden siempre a maximizar su desorden termodinámico. Desde esta perspectiva, podemos considerar que el desorden termodinámico del estado inicial del sistema (aislado) determinará el sentido de la evolución del sistema.

Para abordar el estudio de los sistemas no aislados, no es válido el criterio de maximización de la entropía del sistema; ha de disponerse de datos sobre el entorno.

En las actividades anteriores se presentó el segundo principio de la Termodinámica como resultado de una generalización de la experiencia. Las ideas que se pretenden construir mediante esta actividad aportan una justificación científica del segundo principio desde una perspectiva microscópica fundamentada en la naturaleza corpuscular de los sistemas, y en relación con conceptos de la Mecánica Estadística:

El segundo principio se explica como consecuencia de ciertas suposiciones sobre los niveles de energía de las partículas constituyentes del sistema.

Estas suposiciones se refieren a los aspectos probabilísticos de las distribuciones de energía para las partículas del sistema:

Desde el punto de vista estadístico, se asocian "probabilidades mayores de suceder" a los estados termodinámicamente más desordenados. La energía total de un sistema aislado se conserva (primer principio), y es la distribución de la energía la que determina en qué dirección un proceso es espontáneo, puesto que el sistema tiende a evolucionar hacia estados termodinámicos más probables (segundo principio).

Siguiendo lo desarrollado hasta este punto se puede afirmar que no es absolutamente imposible que un sistema macroscópico aislado evolucione espontáneamente hacia un estado de menor probabilidad. En consecuencia, el segundo principio de la Termodinámica no es un principio absoluto; simplemente, su violación en la escala macroscópica es altamente improbable. La validez del segundo principio, por tanto, queda limitada a los sistemas cuyo número de partículas es lo suficientemente grande como para que las fluctuaciones de la probabilidad de los diferentes estados termodinámicos resulten esencialmente indetectables.

Después de desarrollar estos aspectos en relación con el segundo principio de la Termodinámica, se desarrollarán dos de sus principales consecuencias:

En particular, se relacionará la distribución de energía de los sistemas termodinámicos con el establecimiento de la escala absoluta de temperaturas, también conocida como escala termodinámica o escala Kelvin de temperaturas. A propósito de esta escala se puntualizarán dos ideas básicas:

En primer lugar, se enfatizará en la naturaleza absoluta de esta escala (es independiente de la naturaleza de las sustancias), en contraposición a las diversas escalas relativas de temperatura que se han utilizado durante décadas: la escala Celsius (referida a la sustancia pura agua), la escala Fahrenheit (relativa a la temperatura corporal) y la escala Rankine (concebida para el estudio de las máquinas térmicas). Las divisiones de las escalas relativas, por constituir fracciones de un rango de temperaturas determinado por dos puntos de referencia, son graduadas (grados Celsius, Fahrenheit o Rankine); por el contrario, la unidad de temperatura que aporta la escala absoluta es el Kelvin (y no grado Kelvin), que se relaciona con la energía de los sistemas termodinámicos.

En segundo lugar, se destacará el significado físico del cero Kelvin, considerado el punto en que la energía de cualquier sistema, independientemente de su naturaleza química, es la mínima posible. Se hará mención nuevamente al principio de degradación de la energía, ya desarrollado en la actividad *Fi04*.

La actividad finaliza con una discusión sobre la aplicabilidad de la entropía al análisis del desorden termodinámico en un sistema de gran complejidad: el Universo.

Desde el punto de vista científico, hasta el momento no se ha verificado ni refutado si los sistemas termodinámicos complejos (como los organismos vivos o el

Universo) cumplen o no el segundo principio de la Termodinámica. Actualmente, los datos termodinámicos disponibles se refieren a sistemas relativamente sencillos, y desde la comunidad científica se advierte de que sería poco riguroso extrapolar los resultados de estas investigaciones al estudio de sistemas de tamaño astronómico.

Si se admite la aplicabilidad del segundo principio a la totalidad del Universo, el criterio entrópico puede utilizarse para estudiar la evolución del sistema Universo en su conjunto. Desde esta perspectiva, el sistema aislado Universo se mantendría en evolución mientras su entropía no alcanzase el valor máximo permitido (relacionado con las distribuciones posibles de energía).

Cada proceso realizado en el Universo incrementaría la entropía de éste e implicaría la degradación de una cierta cantidad de energía a energía inútil. En el momento en que la entropía del Universo alcanzase su valor máximo, la distribución de la energía en el sistema sería tal que ningún proceso nuevo podría tener lugar, puesto que toda la energía disponible se habría degradado en transferencias indeseadas. Esta imposibilidad para realizar nuevas transferencias de energía y satisfacer la cuota entrópica significaría que cualquier proceso, en estas condiciones, sería no espontáneo, y que el sistema Universo no tendría ya la capacidad de evolucionar más desde este estado de equilibrio final, o de muerte térmica del Universo.

Todos los procesos termodinámicos, incluidos aquéllos que hacen posible la vida, se detendrían.

La actividad finaliza con una discusión sobre las especulaciones filosóficas derivadas de esta supuesta muerte térmica del Universo, cuya divulgación a finales del siglo XIX suscitó grandes polémicas en la comunidad científica.

A continuación, el *Bloque I* de la secuencia *Termodinámica Química* finaliza con las actividades de aplicación *Fi06* y *Fi07*, cuya finalidad es que los alumnos apliquen las ideas trabajadas en torno a la entropía para analizar, desde una perspectiva microscópica, el desorden termodinámico de los sistemas. En concreto, se pretende que el alumnado ponga en juego los modelos de enlace y estructura de la materia para describir, explicar y predecir nuevos hechos, situaciones y fenómenos relacionados con procesos físicos y químicos.

Actividad Fi06: variaciones de entropía

La intención educativa de esta actividad es que los alumnos transfieran sus conocimientos de Termodinámica Química para elaborar un razonamiento que les permita predecir, desde un punto de vista cualitativo, las variaciones entrópicas asociadas a varios procesos de cambio de fase y a tres reacciones químicas concretas.

Nuevamente, se enfrenta al alumnado a situaciones en las que han de recurrir a modelos microscópicos que relacionen la entropía con el número de microestados de energía –o de distribuciones de energía– disponibles para las partículas del sistema.

Tabla 34: Guion de la actividad Fi06 – variaciones de entropía

Actividad *Fi06*: variaciones de entropía

Dadas las siguientes reacciones:

$$2\ H_{2\ (g)} + O_{2\ (g)} \rightarrow 2\ H_2O_{\ (l)}$$

$$NH_4Cl_{\ (s)} \rightarrow NH_{3\ (g)} + HCl_{\ (g)}$$

$$H_{2\ (g)} + Br_{2\ (g)} \rightarrow 2\ HBr_{\ (g)}$$

A. Predí cómo son los valores (aproximados) de entropía para los estados inicial y final de los tres sistemas químicos planteados. ¿En qué criterios has basado tu predicción?

.....

B. Justifica si la variación de entropía es positiva o negativa para cada una de estas reacciones. ¿Qué información sobre las reacciones químicas aporta el signo de ΔS?

.....

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

.....

Las ideas que los alumnos han de hacer útiles en el desarrollo de esta actividad son las que se resumen a continuación:

En lo referente al análisis entrópico de las tres reacciones planteadas, se pretende que los alumnos identifiquen las reacciones químicas como procesos termodinámicos que tienen lugar en los sistemas químicos; éstos están constituidos, en su estado inicial, por la mezcla de reactivos, y, en su estado final, por la mezcla de productos (más la cantidad de reactivos que no haya reaccionado en cada caso). Para simplificar el estudio del sistema, se supondrá que todas estas reacciones tienen lugar a una temperatura constante. Esta suposición raras veces es rigurosa; pero sí es conveniente, puesto que todos los datos termodinámicos disponibles se han tomado a la temperatura de 25 ºC.

Se supondrá que la presión a la que tienen lugar las reacciones propuestas es la presión atmosférica. En todo caso, se clarificará que las propiedades termodinámicas de los sólidos y de los líquidos varían tan poco con la presión, que las diferencias no suelen ser detectables experimentalmente; en caso de los gases, pequeñas variaciones de la presión sí pueden conducir a variaciones detectables –aunque, por lo general, pequeñas– en las propiedades termodinámicas de los sistemas.

Una vez establecidos el sistema objeto de estudio y sus estados inicial y final, pueden seguirse dos estrategias básicas para estimar cómo varía la entropía de cada uno de estos sistemas con la temperatura:

La primera estrategia pasa por tantear, de forma cualitativa y para cada reacción química, el valor de entropía del estado inicial, S_i, y el valor de entropía del estado final,

S_f; la variación de entropía ΔS de cada reacción se establecerá por comparación entre los valores de S_f y S_i.

La segunda estrategia puede verse, en realidad, como una variante de la primera: consiste en, estimado el valor de S_i, razonar si la reacción implica un aumento, una disminución o ninguna variación apreciable en la entropía del sistema.

Para estimar los valores de entropía inicial y final, se atenderá a los factores que influyen en el desorden termodinámico de los sistemas materiales:

- El estado de agregación de las sustancias que constituyen el sistema: ya se ha avanzado la idea de que el valor de entropía de cualquier sustancia gaseosa es sustancialmente mayor que el de cualquier líquido, y éste, mayor que el de cualquier sólido.
- El tamaño molecular y la masa molecular: las sustancias químicas con mayor número de partículas por mol presentan mayores valores de entropía. Análogamente, las sustancias constituidas por átomos de mayor masa también presentan mayor entropía.
- Las interacciones intermoleculares débiles (enlaces de hidrógeno, fuerzas de dispersión de London…): aunque esta contribución al desorden termodinámico de los sistemas es relativamente pequeña, en algunos casos resulta decisiva. Por ejemplo, la gran diferencia que existe entre los valores estándar de entropía del amoníaco gaseoso y de la fosfina gaseosa se relaciona con las restricciones energéticas impuestas por el enlace de hidrógeno en el caso del amoníaco, que presenta un valor entropía significativamente menor: S [$NH_{3\ (g)}$] = 193,0 J/mol·K; S [$PH_{3\ (g)}$] = 210,0 J/mol·K (valores tomados a 26 ºC).

Para reacciones que implican sólo sustancias puras, el signo de ΔS dependerá en general de la variación del número de moles del gas. Si éste es positivo, ΔS será positivo; si éste es negativo, ΔS también lo será. Si es nulo, la única predicción posible es que el valor de ΔS será pequeño.

El análisis entrópico de las tres reacciones químicas propuestas se concreta a continuación:

1ª reacción: $2\ H_{2\ (g)} + O_{2\ (g)} \rightarrow 2\ H_2O_{(l)}$

El sistema, en su estado inicial, está compuesto por una sola fase gaseosa; en el estado final, se está compuesto por una única fase líquida, si se supone que la reacción es cuantitativa y, como consecuencia, puede despreciarse la pequeña cantidad de reactivos que permanezca sin reaccionar.

Esta reacción es un proceso termodinámico mediante el cual un sistema homogéneo constituido por 3 mol de sustancias químicas gaseosas da lugar a 2 mol de sustancia líquida. Se enfatizará en el carácter extensivo de la variable entropía a través de

dos ideas: por un lado, al valor de entropía total del sistema contribuyen los valores de entropía de todas las sustancias implicadas; además, cada sustancia química representa una contribución mayor o menor a la entropía total dependiendo del número de partículas (número de moles) que aporte al sistema.

La variación de entropía asociada a esta reacción es claramente negativa ($\Delta S < 0$), puesto que el desorden termodinámico disminuye a lo largo del proceso. Se distinguirá, en todo caso, que los valores de entropía del estado inicial y del estado final son siempre positivos; ΔS puede ser negativa, como resultado de la comparación de un valor positivo y pequeño en valor absoluto, con otro positivo y mayor en valor absoluto.

En el estado final, las partículas del sistema tendrán menores posibilidades de distribución entre niveles energéticos, debido a varios factores: se produce una disminución del número de moles de sustancia; el número de moles de gas es menor en el estado final que en el estado inicial; en el estado final, el establecimiento de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua hace que el valor de la entropía final sea ligeramente menor de lo esperable para un líquido; dado que los tamaños moleculares de todas las sustancias involucradas son similares, la contribución del tamaño molecular puede despreciarse.

2ª reacción: $NH_4Cl_{(s)} \rightarrow NH_{3\,(g)} + HCl_{(g)}$

Esta reacción es un proceso termodinámico mediante el cual un sistema homogéneo constituido por 1 mol de sustancia sólida da lugar a 2 mol de sustancias gaseosas. La variación de entropía asociada a esta reacción es claramente positiva ($\Delta S > 0$), puesto que el desorden termodinámico aumenta a lo largo del proceso. En el estado final, las partículas del sistema tendrán mayores posibilidades de distribución entre niveles energéticos, debido a que: se produce un aumento en el número de moles de sustancia; el número de moles de gas es mayor en el estado final que en el estado inicial; en el estado final, el establecimiento de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de amoníaco y las de cloruro de hidrógeno hace que el valor de la entropía sea menor de lo esperable para un sistema gaseoso, aunque considerablemente mayor que el del estado inicial; dado que los tamaños moleculares de todas las sustancias involucradas son similares, la contribución del tamaño molecular puede despreciarse.

3ª reacción: $H_{2\,(g)} + Br_{2\,(g)} \rightarrow 2\,HBr_{(g)}$

Esta reacción es un proceso termodinámico mediante el cual un sistema homogéneo constituido por 2 mol de sustancias gaseosas dan lugar a 2 mol de una sustancia gaseosa. Para este caso, no es posible *a priori* predecir si la variación de entropía será positiva o negativa; sí puede predecirse que, positivo o negativo, el valor de ΔS de la reacción será pequeño.

El desorden termodinámico, pues, apenas variará a lo largo del proceso. En el estado final, las partículas del sistema tendrán similares posibilidades de distribución

entre niveles energéticos, puesto que: no varía el número de moles de sustancia; el número de moles de gas no varía entre los estados inicial y final; en el estado final, el establecimiento de enlaces de hidrógeno (débiles) entre las moléculas bromuro de hidrógeno hace que el valor de la entropía sea ligeramente menor de lo esperable para un sistema gaseoso; dado que los tamaños moleculares de todas las sustancias involucradas son similares, esta contribución puede despreciarse.

El profesor puede, a su criterio, utilizar estos sistemas químicos para establecer comparaciones entre los valores de entropía de las diferentes sustancias químicas gaseosas, líquidas o sólidas. Por ejemplo, se pueden comparar los valores de entropía molar estándar de cuatro de estas sustancias gaseosas: S [$O_{2\ (g)}$] = 205,0 J/mol·K; S [$H_{2\ (g)}$] = 131,0 J/mol·K; S [$HCl_{\ (g)}$] = 187,0 J/mol·K; S [$NH_{3\ (g)}$] = 193,0 J/mol·K (valores tomados a 26 ºC). Atendiendo a los factores anteriormente tratados, se justifican sus valores de entropía:

S [$H_{2\ (g)}$] < S [$O_{2\ (g)}$] < S [$HCl_{\ (g)}$] < S [$NH_{3\ (g)}$]

Con esta actividad termina el *Bloque I* de la secuencia *Termodinámica Química*.

Bloque II: la energía de Gibbs. Espontaneidad y equilibrio en los procesos químicos

El *Bloque II* está constituido por las actividades *Fi09 – Fi16*. Su objetivo principal es que el alumnado, mediante la realización de estas actividades, adquiera una perspectiva general del análisis termodinámico de los procesos químicos. Además, se pretende que los estudiantes se familiaricen con la energía de Gibbs como un nuevo criterio de espontaneidad y equilibrio para el estudio de las reacciones. Por otra parte, mediante estas actividades se incorporarán nociones relacionadas con los aspectos cinéticos y de equilibrio, con el objetivo de incluir la Termodinámica Química en una visión global de la Química.

La secuenciación de las actividades *Fi09 – Fi12* está orientada a construir el concepto de energía de Gibbs. En la actividad *Fi09*, se plantea a los alumnos el principal inconveniente de utilizar el criterio entrópico en el estudio de los sistemas químicos: la necesidad de conocer el entorno. Se evidencia así la conveniencia de encontrar una nueva función de estado del sistema que proporcione un criterio de espontaneidad y de equilibrio cuya aplicación a los sistemas químicos no implique disponer de información sobre el entorno. Este criterio es la energía de Gibbs, cuyo significado se desarrollará mediante las actividades de reestructuración *Fi10* y *Fi11*.

Después de ofrecer información a los alumnos sobre esta nueva función termodinámica, las actividades *Fi10 – Fi16* se centran en que los alumnos transfieran sus conocimientos de Termodinámica Química a la descripción e interpretación de distintos hechos, situaciones y fenómenos concretos. Se ha elegido como hilo conductor de las tres primeras actividades de aplicación (actividades *Fi10*, *Fi11* y *Fi12*) una reacción

significativa para el alumnado: la descomposición térmica de la piedra caliza en cal viva y dióxido de carbono.

Finalmente, las actividades desde la *Fi13* hasta la *Fi16* presentan al alumnado nuevas situaciones problemáticas abiertas cuya resolución requiere la integración de las interpretaciones macroscópica y microscópica de la materia. Las tres últimas actividades introducen determinados conceptos cinéticos y de equilibrio; con ello se busca complementar los conocimientos procedentes del marco termodinámico con conocimientos procedentes de otras disciplinas: la Cinética Química y el Equilibrio Químico. Explicitando la relación entre las tres principales áreas de conocimiento que componen la dinámica de las reacciones químicas, se pretende ayudar al alumnado en la construcción de visión global, integradora y actualizada de la ciencia Química.

Actividad Fi07: ordenando ideas…

Esta actividad de exploración tiene por objetivo cuestionar la utilidad del criterio entrópico para predecir la espontaneidad de los procesos que tienen lugar en los sistemas químicos (casi siempre no aislados). El planteamiento de la actividad se basa en fomentar la reflexión sobre dos afirmaciones científicamente aceptadas y "aparentemente contradictorias" si no se tiene en cuenta que la variación de entropía del sistema sólo es un criterio de espontaneidad válido para analizar los procesos que tienen lugar en los sistemas aislados:

Tabla 35: Guion de la actividad Fi07 – ordenando ideas…

Actividad *Fi07*: ordenando ideas…

Presentamos a continuación dos afirmaciones con las que la ciencia está de acuerdo:

1) A presión atmosférica, el agua congela espontáneamente a −5 °C.

2) El hielo tiene una estructura más ordenada que el agua líquida.

A. ¿Cómo explicas que el proceso espontáneo descrito por la afirmación 1) lleve, según la afirmación 2), a una disminución de la entropía del sistema?

B. ¿Crees posible que sea espontáneo un proceso que implique un aumento en la entropía del sistema? Justifica tu respuesta.

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Las ideas clave que se desarrollarán en esta actividad son las siguientes:

En primer lugar, los alumnos analizarán la "validez científica" de las dos afirmaciones propuestas. El objetivo de esta primera reflexión es doble: por un lado, se pretende que los alumnos hagan útiles sus conocimientos para valorar cualquier afirmación que se les presente, independientemente de que las fuentes de información parezcan verosímiles o procedan de un ámbito fiable, como puede ser el ámbito

académico. Además, los alumnos han de movilizar los conceptos termodinámicos para analizar un fenómeno concreto (la solidificación del agua a una temperatura inferior a la de congelación) mediante un hecho concreto (el desorden termodinámico de dos sustancias químicas puras):

Afirmación 1):

El proceso termodinámico propuesto es la solidificación del agua líquida a la temperatura de –5 ºC en condiciones atmosféricas de presión. Se identificará una muestra de agua pura como el sistema objeto de estudio. Para poder considerar que el proceso objeto de estudio es la solidificación del agua, ha de inferirse que en las condiciones iniciales el sistema se encuentra en estado líquido, a presión de 1 atm y a una temperatura superior a los 273 K; el sistema experimenta un proceso termodinámico durante el cual la presión se mantiene constante en el valor 1 atm, y la temperatura desciende hasta un valor final de 268 K. En las condiciones del estado final, el sistema se halla en estado sólido.

A fin de que los alumnos planteen y debatan libremente sus propias suposiciones sobre esta situación abierta, el planteamiento de la actividad no aporta información sobre el entorno. Se podrá suponer que el sistema (agua) se encuentra en un recipiente abierto de vidrio, con lo cual se mantendría la presión atmosférica. En el intervalo de temperaturas considerado, el sistema apenas transfiere materia al entorno por el proceso de evaporación; por ello, este sistema puede clasificarse como cerrado.

Para un sistema compuesto inicialmente por agua pura, que experimenta un proceso isobárico a 1 atm, el proceso de cambio de fase líquido-sólido será espontáneo a un valor de temperatura igual o inferior a los 273 K.

Afirmación 2):

La estructura del hielo es termodinámicamente más desordenada que la del agua en estado líquido; esta idea ya se ha desarrollado en la actividad anterior. Consideremos una muestra de hielo puro y una muestra de agua líquida pura. Si ambas muestras se encuentran a la misma temperatura (273 K), se observa que las partículas de la muestra de agua presentan mayores posibilidades de distribuirse en niveles energéticos diferentes (el número de microestados de energía accesibles es mayor), puesto que las restricciones energéticas impuestas por los enlaces de hidrógeno que retienen a las entidades moleculares H_2O son considerablemente menores que las impuestas por las interacciones establecidas en la red cristalina tridimensional del hielo.

Se mencionará la existencia de nueve fases sólidas diferentes para la sustancia química agua, cada una de ellas estable en un cierto intervalo de temperatura y presión. La estructura cristalina que se tratará en esta actividad es la del hielo I, estable a presión atmosférica en condiciones de temperatura inferiores a los 273 K.

Una vez evaluadas las dos anteriores afirmaciones desde el punto de vista científico, se concluye que ambas están de acuerdo con los constructos científicos. A

continuación, se pretende que los alumnos utilicen el concepto de entropía para analizar la coherencia entre ambas relaciones:

El grado de desorden termodinámico del sistema se relaciona directamente con la entropía del sistema. A lo largo del proceso termodinámico propuesto, el desorden termodinámico del sistema disminuye paulatinamente como consecuencia del descenso de temperatura: a medida que la temperatura disminuye, las partículas dispondrán de menos niveles de energía permitidos. El valor de entropía del sistema, pues, disminuye a lo largo del proceso.

Mediante esta actividad se pretende explorar las ideas del alumnado sobre la relación que existe entre la entropía y la evolución de los sistemas químicos. En particular, se trata de diagnosticar si los alumnos consideran la entropía de los sistemas (aislados o no aislados) como criterio para predecir la espontaneidad de los proceso termodinámicos.

Para los sistemas aislados, cualquier proceso espontáneo supone un incremento en el valor de entropía del sistema.

En el caso de los sistemas no aislados, la variación de entropía del sistema no es un criterio válido para predecir qué proceso será espontáneo en unas condiciones determinadas, puesto que el entorno se ve implicado en los procesos energéticos que modifican el desorden termodinámico de las partículas del sistema. Para estudiar la evolución de un sistema no aislado, el criterio entrópico ha de aplicarse al conjunto que forman el sistema y el entorno, que conforman el sistema aislado universo. Cualquier proceso espontáneo hace aumentar la entropía del universo en su conjunto.

Mediante la aplicación de este razonamiento, se resuelve la situación propuesta: las afirmaciones 1) y 2), científicamente aceptadas, son coherentes entre sí:

Aunque el sistema ve disminuido su valor de entropía a lo largo del proceso propuesto, ha de recordarse que la variación de la entropía del sistema no puede tomarse como criterio válido para conocer si el proceso es espontáneo o no: debe atenderse también a la entropía del entorno.

Debido a la complejidad del universo, no es posible *a priori* predecir cómo será la variación de entropía del entorno. No obstante, se pueden inferir el signo y la magnitud aproximada de $\Delta S_{entorno}$ mediante un razonamiento basado en el segundo principio de la Termodinámica: *dado que este proceso es espontáneo en las condiciones especificadas, y dado que la entropía del sistema disminuye a lo largo del proceso, la variación de entropía del entorno debe ser necesariamente positiva, y de una magnitud tal que el aumento de entropía del entorno "compense" la disminución de entropía del sistema*.

El profesor enfatizará en el hecho que, en Química, la mayor parte de los sistemas reaccionantes son cerrados o pueden considerarse como tales, si las condiciones de temperatura y presión no favorecen la evaporación de disolventes o reactivos. La utilización del criterio entrópico para el estudio de estos sistemas químicos requeriría

disponer de información sobre el entorno, lo cual no siempre es posible y, en todo caso, no es deseable, si puede evitarse.

Esta idea servirá para hacer ver al alumnado la conveniencia de buscar un nuevo criterio de espontaneidad con el que se evite el estudio del entorno. Este criterio vendrá dado por la variación de una nueva variable termodinámica que verifique las siguientes características:

debe ser una función de estado del sistema;

las variables con las que se relacione esta nueva función de estado deben referirse exclusivamente a las propiedades termodinámicas del sistema, obviando las características del entorno;

la variación de esta función de estado en el transcurso de cualquier proceso espontáneo ha de aportar información sobre el propio proceso (espontaneidad) y sobre el estado final hacia el que tiende a evolucionar el sistema mediante el proceso (estado final de equilibrio del sistema).

Este criterio de espontaneidad es la variación de la energía de Gibbs, que se presenta en la actividad de reestructuración *Fi09*.

Actividad Fi08: el criterio de espontaneidad G

Esta actividad de reestructuración ofrece información al alumnado acerca de la función de Gibbs, función de estado más conocida como energía de Gibbs.

Mediante esta actividad se pretende construir en el aula el concepto de energía de Gibbs como una función de estado del sistema gracias a la cual es posible predecir la espontaneidad de los procesos químicos sin tener en cuenta, en ningún caso, la naturaleza del entorno. La información aportada por esta actividad se complementa con la incluida en la actividad de reestructuración *Fi09*, mediante la cual se integrará la relación entre la función de Gibbs y el equilibrio de los sistemas termodinámicos, y se desarrollará el significado de la ecuación fundamental de la Termodinámica.

Hasta el momento, todas las propiedades termodinámicas que se han presentado al alumnado (energía interna, entalpía, entropía…) han sido construidas a partir de hechos o fenómenos que se relacionan directamente con la experiencia. Sin embargo, no es fácil trazar una estrategia similar para introducir la función de Gibbs.

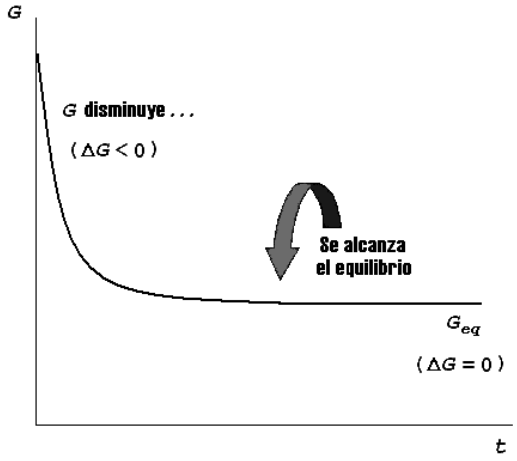
Debido al alto grado de abstracción y la elevada demanda conceptual de este concepto (Dixon y Emery, 1965), creemos conveniente que el profesor presente a los alumnos el planteamiento de las investigaciones realizadas por Gibbs:

A finales del siglo XIX, cuando la Termodinámica se hallaba en pleno desarrollo teórico y procedimental, diversos investigadores centraron sus esfuerzos en definir nuevas funciones de estado mediante las cuales se pudieran relacionar las numerosas nociones termodinámicas ya conocidas. Las investigaciones más sobresalientes son sin

duda las de Helmholtz y Gibbs, de cuyas conclusiones se extraen dos funciones de estado de gran utilidad termodinámica: la función de Helmholtz y la función de Gibbs. Definidas como combinaciones de otras funciones de estado, estas dos funciones proporcionan criterios de espontaneidad y equilibrio para determinados procesos termodinámicos que tengan lugar en cualquier tipo de sistema (ya sea aislado, cerrado o abierto). La utilidad de la función de Helmholtz resulta bastante limitada en el ámbito de la Química, puesto que se refiere a procesos que sucedan a temperatura y volumen constantes; pocos procesos de interés químico verifican estas condiciones. Sí es útil para los químicos la función de Gibbs, que se define para procesos isotérmicos isobáricos.

Tabla 36: Guion de la actividad Fp08 – el criterio de espontaneidad G

Actividad *Fi08*: el criterio de espontaneidad *G*



Ya conoces una condición de espontaneidad para los procesos termodinámicos: que la entropía del universo sea máxima.

Aunque este criterio es válido, no resulta cómodo para estudiar los sistemas no aislados. Como en Química se suele trabajar con sistemas cerrados, conviene buscar una función de estado extensiva del sistema, que nos permita predecir la espontaneidad de una reacción ignorando las características del entorno. Esta función es la energía de Gibbs o función de Gibbs, *G*.

Para cualquier reacción química que tenga lugar en condiciones de *T* y *p* constantes e iguales en los estados inicial y final del sistema, el signo de la variación de la energía de Gibbs (ΔG) nos indica si la reacción química ocurre espontáneamente o no.

Gibbs observó que, cuando en un sistema cerrado se mantienen *T* y *p* constantes, cualquier proceso termodinámico espontáneo verificará que la combinación de funciones de estado ($H - T \cdot S$), que es a su vez función de estado, disminuye continuamente hasta que el sistema alcanza el equilibrio, punto en que la función ($H - T \cdot S$) adquiere su valor mínimo; o, lo que es lo mismo, en el equilibrio se cumple que ($\Delta H - T \cdot S$) = 0.

Esta función, descubierta por Gibbs, es la energía de Gibbs. Su variación se describe:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Para entender el significado de ΔG, analizaremos los términos de la ecuación que la describe:

- el término ΔH representa la cantidad neta (total) de energía que el sistema transfiere con el entorno durante la reacción química.
- el término $T \cdot \Delta S$ representa la cantidad de energía que se degrada al transferirse entre el sistema y el entorno.

Así pues, ΔG representa la cantidad de energía aprovechable transferida entre el sistema y el entorno. El valor de ΔG nos indica, pues, el máximo trabajo

útil que puede obtenerse de una reacción química.

Ya hemos comentado que *G* disminuye continuamente en las reacciones espontáneas, hasta que se alcanza el equilibrio, en el cual *G* alcanza su mínimo.

Así, una reacción para la cual $\Delta G = 0$ es una reacción en equilibrio.

(En Termodinámica se define el equilibrio como el estado del sistema en el cual todas las funciones termodinámicas permanecen constantes.)

Y, ¿qué sucede mientras $\Delta G \neq 0$?

Si $\Delta G < 0$ la reacción es espontánea

Si $\Delta G > 0$ la reacción no será espontánea si no se realiza trabajo sobre el sistema (la reacción espontánea es exactamente la inversa a la descrita).

Gibbs observó que, en condiciones de *T* y *p* constantes, las funciones de estado entalpía y entropía verifican una relación determinada:

La expresión ($H - T \cdot S$) disminuye durante el proceso termodinámico hasta que el sistema alcanza el equilibrio; en este estado, la relación ($H - T \cdot S$) presenta su mínimo. Por ser una combinación de funciones de estado, ($H - T \cdot S$) es a su vez función de estado. Esta función, descubierta por Gibbs, lleva su nombre:

$$G = H - T \cdot S \quad \textit{(función de Gibbs, o energía de Gibbs)}$$

El significado de la función de Gibbs se establecerá atendiendo a los dos términos de la expresión mediante la cual Gibbs la definió. De este modo, la variación de la energía de Gibbs adquiere el significado de un nuevo balance energético relacionado con los procesos termodinámicos: al constituir la diferencia entre la energía total transferida durante el proceso, y la energía degradada al transferirse en el proceso, ΔG representa la máxima cantidad de energía aprovechable (útil) en la realización del proceso.

La energía de Gibbs se relaciona con la máxima cantidad de trabajo útil, entendido como tal la energía máxima transferible por un proceso de trabajo, distinto al de expansión, que el sistema realiza sobre el entorno.

Desde hace décadas, la energía de Gibbs se conoce por nombres que la relacionan con el número de grados de libertad de un sistema. Estas antiguas denominaciones (*entalpía libre*, *energía libre* o *energía libre de Gibbs*) se consideran poco rigurosas; la comunidad científica desaconseja su utilización.

El docente atenderá a las posibles identificaciones alternativas que puedan surgir. Desde la investigación educativa se advierte de que es frecuente la identificación entre la energía de Gibbs y la energía ganada, perdida o no invertida por el sistema durante una reacción. También se han detectado identificaciones de la energía de Gibbs como la energía transferida entre el sistema y el entorno, y con la energía interna que hace reaccionar a las sustancias (Selepe y Bradley, 1997; Thomas y Schwenz, 1998).

Se aludirá al carácter extensivo de la función de Gibbs, en relación al carácter extensivo de la entalpía y de la entropía.

De la interpretación de la energía de Gibbs, se deduce la utilidad de ΔG como criterio de espontaneidad de los procesos y como criterio de equilibrio para los sistemas químicos:

Cualquier reacción química espontánea tendrá lugar si se dispone de energía útil que transferir. O, lo que es lo mismo, cualquier reacción química espontánea verificará que $\Delta G < 0$.

La función de Gibbs permite además definir la condición de equilibrio termodinámico para los sistemas:

El estado de equilibrio se puede definir como aquel estado del sistema en el cual no se observan variaciones para ninguna de las funciones termodinámicas que describen el estado del sistema. En el estado de equilibrio, pues, también la función de Gibbs alcanzará un valor constante ($\Delta G = 0$), que será el mínimo alcanzable para el sistema en las condiciones consideradas: $G_{eq} = \min(G)$.

Se explicitará que las condiciones de validez del criterio de espontaneidad y equilibrio $\Delta G \leq 0$ están restringidas a los procesos que verifiquen que los valores de p y T sean constantes e iguales en los estados inicial y final del sistema. Durante el proceso termodinámico, sin embargo, T y p pueden variar, puesto que G es función de estado.

Estas condiciones son precisamente las que hacen de ΔG el criterio de espontaneidad y equilibrio más útil en Química, puesto que la mayoría de las reacciones químicas y de las transiciones de fase ocurren en condiciones de presión y temperatura constantes.

La literatura científica ha revelado que muchos alumnos tienen dificultades a la hora de distinguir una variable termodinámica de la variación de la variable. Esta dificultad, que se detecta en alumnos de diferentes niveles educativos, parece especialmente persistente en el caso de la energía de Gibbs (ver, por ejemplo: Banerjee, 1995; Sözbilir, 2002). A este respecto, recomendamos al docente que explicite la diferencia entre G y ΔG apoyándose en el cambio que experimenta el valor de la energía de Gibbs en el transcurso de una reacción química espontánea.

La función de Gibbs, G, decrece continuamente durante cualquier proceso termodinámico espontáneo, y se hace mínima en el equilibrio (valor G_{eq}).

La variación de la energía de Gibbs, ΔG, es negativa durante cualquier proceso espontáneo, y se hace cero en el equilibrio, puesto que el sistema deja de evolucionar desde el punto de vista macroscópico ($\Delta G = 0$).

Actividad Fi09: ΔG como criterio de espontaneidad y equilibrio

En esta actividad de reestructuración se informa al alumnado sobre la ecuación fundamental de la Termodinámica, que relaciona las funciones de estado entalpía, entropía y energía de Gibbs.

Tabla 37: Guion de la actividad Fp09 – ΔG como criterio de espontaneidad y equilibrio

Actividad *Fi09*: *ΔG* como criterio de espontaneidad y equilibrio

Hemos visto que la variación de la energía de Gibbs (ΔG) proporciona un criterio útil para predecir la espontaneidad de cualquier proceso que tenga lugar en condiciones de T y p constantes e iguales en los estados inicial y final del sistema: $\Delta G < 0$.

Pero, además, el valor de ΔG nos ofrece también un criterio de equilibrio: un sistema se halla en equilibrio cuando el valor de G es mínimo (o, lo que es lo mismo, cuando $\Delta G = 0$). Un sistema químico cerrado evolucionará, pues, en el sentido en que disminuya el valor de G ($\Delta G < 0$) hasta alcanzar el valor de G mínimo en el equilibrio.

Por ello, cuando se estudian las reacciones químicas interesa conocer su valor de ΔG:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$ Ecuación Fundamental de la Termodinámica

Como podemos ver, los valores de ΔH y ΔS del sistema no informan sobre la espontaneidad de una reacción, pero sí son útiles a la hora de conocer ciertas condiciones que favorecen la reacción que nos interese:

- Si $\Delta H > 0$ y $\Delta S > 0$ la reacción es espontánea sólo si $|T \cdot \Delta S| > |\Delta H|$
- Si $\Delta H > 0$ y $\Delta S < 0$ la reacción NUNCA es espontánea
- Si $\Delta H < 0$ y $\Delta S > 0$ la reacción SIEMPRE es espontánea
- Si $\Delta H < 0$ y $\Delta S < 0$ la reacción es espontánea sólo si $|\Delta H| > |T \cdot \Delta S|$

En resumen, una reacción química se ve favorecida si hace aumentar la variación de entropía del sistema, y también si hace disminuir la variación de entalpía del sistema.

Hemos visto que ΔG es el mejor criterio para conocer si una reacción química es espontánea en unas condiciones de T y p dadas. Pero, ¿cómo conocer la ΔG de una reacción?

Aunque existen tablas termodinámicas que contienen algunos datos de ΔG, por lo general se necesita recurrir al cálculo de ΔG a partir de los valores de ΔH y ΔS. Además, por ser G una función de estado, también podemos calcular la variación de la energía de Gibbs normal (ΔG^0) de una reacción química como la diferencia entre los sumatorios de las energías de Gibbs normales de los productos y de los reactivos:

$$\Delta G = \Sigma\,[G\ (\text{productos})] - \Sigma[G\ (\text{reactivos})]$$

Mediante esta actividad se pretende que los alumnos revisen y reestructuren sus ideas sobre las tres funciones de estado más importantes en Termodinámica Química, y que las relacionen en torno a una expresión algebraica útil para analizar la evolución de los sistemas termodinámicos. Esta expresión algebraica es la ecuación fundamental de la Termodinámica, que se deriva directamente de la definición de la energía de Gibbs; de hecho, constituye la expresión algebraica de la ΔG asociada a cualquier proceso.

En esta actividad se desarrollan conceptos ya conocidos para el alumnado. La principal intención educativa en este momento es que los estudiantes analicen las condiciones en las que un determinado proceso será espontáneo o no. Esta interpretación

se basa en los propios significados físicos de las variables termodinámicas y en la relación que ofrece la ecuación fundamental de la Termodinámica. Además, se estructura en torno a diversos conceptos:

- El valor de la variación de entalpía asociada al proceso, ΔH: un valor negativo de ΔH favorecerá la espontaneidad del proceso. Las transferencias netas de energía desde el sistema hacia el entorno implican que el sistema gana estabilidad y, al mismo tiempo, "produce" un cierto desorden termodinámico en el entorno.
- El valor de la temperatura absoluta del proceso, T: un proceso se ve más favorecido cuanto mayor sea el valor de la temperatura. A mayor temperatura (absoluta), mayor será la cantidad de energía que el sistema podrá transferir con su entorno, y mayores serán las posibilidades de distribución energética de las partículas del sistema.
- El valor de la variación de entropía asociada al proceso, ΔS: una variación de entropía positiva favorecerá la espontaneidad del proceso. El hecho de que el desorden termodinámico del sistema aumente durante el proceso, ya constituye una contribución favorable para un aumento global del desorden termodinámico del universo.
- El signo de la variación de la energía de Gibbs asociada al proceso, ΔG: el criterio de espontaneidad utilizado para evaluar la viabilidad de los procesos químicos es ΔG. Su signo se deducirá mediante la evaluación de los tres factores indicados.

Además, se busca dar sentido a la simbología matemática mediante la cual se relacionan las variables termodinámicas H, S y G.

Un valor negativo para el término ΔH indica que existe una transferencia neta de energía desde el sistema hacia el entorno y, por lo tanto, la realización de un trabajo por parte del sistema.

Un valor positivo para el término $T \cdot \Delta S$ implica un "cómputo favorable" de la energía degradada en el transcurso del proceso; ha de recordarse que la realización de los procesos incontrolados de degradación de la energía se relaciona directamente con la viabilidad de los procesos termodinámicos.

Se hará explícito que el signo del término $T \cdot \Delta S$ depende exclusivamente del signo de ΔS, puesto que T, la temperatura absoluta, es siempre positiva por definición.

El signo de la variación de la energía de Gibbs asociada al proceso, ΔG, se estima como resultado del balance entre las dos contribuciones anteriores. Este resultado presenta cuatro combinaciones posibles de signos:

- ***Si $\Delta H > 0$ y $\Delta S > 0$***: el proceso será espontáneo si la contribución desfavorable del primer término es menor, en valor absoluto, que la contribución favorable del segundo término.

- ***Si ΔH > 0 y ΔS < 0***: ambas contribuciones a la energía de Gibbs son desfavorables, por lo que el sistema no dispondrá de energía útil que transferir. El proceso no puede ser espontáneo en ninguna de las condiciones a las que se pueda someter al sistema.
- ***Si ΔH < 0 y ΔS > 0***: dado que ambas contribuciones son favorables a la realización del proceso, éste será espontáneo en cualesquiera condiciones.
- ***Si ΔH < 0 y ΔS < 0***: la espontaneidad del proceso está condicionada a que la contribución (favorable) del primer término sea mayor, en valor absoluto, que la contribución (desfavorable) del segundo término.

Se explicitará que la espontaneidad depende de la temperatura a la que tenga lugar el proceso, incluso para aquellos procesos que sean espontáneos a cualquier valor de temperatura. Se trata de hacer ver a los alumnos que la dependencia de unas variables con respecto de otras obedece a al significado físico de las variables, y no a los valores numéricos que éstas adopten en una situación determinada.

En relación con la variable temperatura y su influencia sobre los procesos termodinámicos, se planteará el hecho de que, en ocasiones, resulta imposible llevar a cabo reacciones químicas espontáneas si las temperaturas son extremadamente altas o extremadamente bajas. Ello se debe, en algunos casos, a la imposibilidad de recrear semejantes condiciones en el laboratorio o en la planta industrial. En el caso de determinadas reacciones, existen además impedimentos de tipo químico: en condiciones extremas de temperatura, es posible que no reaccione o incluso se degrade alguno de los reactivos, o bien que se degrade el propio producto de interés.

El carácter extensivo de la función de Gibbs se pone de manifiesto en la posibilidad de calcular la variación de la energía de Gibbs de una reacción química como la diferencia entre los valores de *G* para los productos y los reactivos:

$$\Delta G = \Sigma G_{\text{productos}} - \Sigma G_{\text{reactivos}}$$

Llegados a este punto de la intervención, mediante las actividades de aplicación *Fi10 – Fi16* se pretende que los alumnos transfieran sus conocimientos a la descripción, interpretación y predicción de diversas situaciones, hechos y fenómenos.

Cada una de las tres primeras actividades de aplicación (actividades *Fi10 – Fi12*) plantea una situación relacionada con una de las reacciones químicas que se ha utilizado desde la época prehistórica: la descomposición térmica de la piedra caliza. En relación con este proceso químico, los alumnos movilizarán sus conocimientos sobre Termodinámica Química para resolver una serie de cuestiones de interés industrial.

Dos de las actividades de aplicación permiten desarrollar aspectos CTS referidos a problemas medioambientales, como, por ejemplo, la contaminación ambiental por parte de la industria pirometalúrgica (*Fi13*), o la devastación causada por la utilización de los materiales explosivos (*Fi14*). En estas actividades, se elaborarán razonamientos

fundamentados en los conocimientos sobre la Termodinámica, la estructura química, la reactividad…) para tomar decisiones que ayuden a mejorar la explotación de los recursos minerales y a implantar métodos útiles para evitar las emisiones de gases contaminantes o para recuperar zonas contaminadas.

Además de las decisiones relacionadas con la conservación del medio ambiente, se pretende también fomentar una reflexión sobre la incidencia de los aspectos socioeconómicos y tecnológicos en la actividad científica e industrial. Por ejemplo, la actividad *Fp15*, centrada en el análisis del proceso Haber, plantea la problemática de la optimización de los métodos de producción industrial.

En este tipo de actividades, los alumnos han de hacer útiles sus conocimientos para obtener una serie de conclusiones científicamente fundamentadas que les ayuden a tomar decisiones sobre un tema concreto. Trabajarán en pequeños grupos, con el fin de que hagan explícitas sus ideas y defiendan sus criterios de elección mediante la argumentación. Se realizarán puestas en común de ideas, en gran grupo; en ellas, se debatirán las ideas propuestas por cada grupo y se adoptarán decisiones mediante el consenso y con ayuda y supervisión del docente. Mediante esta estrategia se pretende que la sucesión de experiencias próximas a los alumnos sirva para afianzar el significado y la relación entre conceptos, modelos, estrategias, destrezas y actitudes. Las múltiples interrelaciones entre los constructos teóricos y procedimentales de la Ciencia, al evolucionar de acuerdo con la ciencia escolar, proporcionarán a los alumnos una perspectiva fructífera y funcional para la descripción, interpretación y predicción de los hechos, fenómenos y situaciones problemáticas que se les presenten.

En todo momento se fomentará también el desarrollo de estrategias y procedimientos para la resolución de problemas haciendo uso de los métodos algebraicos. El docente enfatizará en que la aplicación de los conceptos y procedimientos matemáticos a la resolución de problemas científicos no debe constituir un fin en sí misma, sino un instrumento al servicio del razonamiento para obtener, transformar y analizar datos que ayuden a interpretar la realidad.

Varias de las actividades propuestas ponen de manifiesto la necesidad de integrar los tres dominios de conocimiento de la Química (macroscópico, microscópico y simbólico) para dar respuesta a los problemas planteados.

Por otra parte, las tres últimas actividades involucran ideas relacionadas con los aspectos cinéticos y de equilibrio de las reacciones químicas. La imposibilidad de estudiar termodinámicamente la velocidad de los procesos químicos permitirá clarificar los límites de la Cinética Química y la Termodinámica Química. Partiendo de la posibilidad de definir el equilibrio químico mediante constructos termodinámicos, se podrá relacionar la evolución de los sistemas químicos con el desplazamiento del equilibrio químico.

Así pues, al final de la secuencia *Termodinámica Química* se amplía la perspectiva termodinámica de las reacciones químicas con nuevos conceptos procedentes de otros

campos de conocimiento de la Química. La finalidad de esta integración de ideas es que los alumnos sitúen la Termodinámica Química como una disciplina científica que, junto con la Cinética Química y el Equilibrio Químico, analiza la dinámica de las reacciones químicas.

Actividad Fi10: piedra caliza (I) – estabilidad

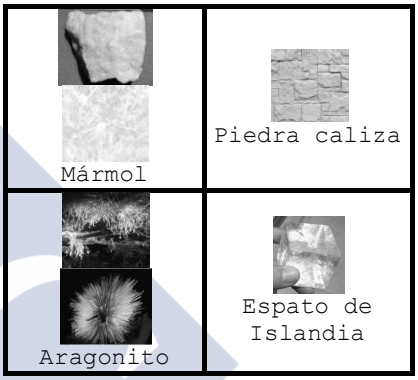
Mediante esta actividad de aplicación y las dos siguientes, se pretende que el alumnado haga útiles los conceptos y relaciones termodinámicas trabajadas para estudiar los aspectos termodinámicos fundamentales de la descomposición térmica del carbonato cálcico en cal viva y dióxido de carbono.

Tabla 38: Guion de la actividad Fp10 – piedra caliza (I) – estabilidad

Actividad *Fi10*: piedra caliza (I) – estabilidad

El calcio representa alrededor de un 3,4% de la masa total de la corteza terrestre. Normalmente se encuentra en forma de carbonatos minerales provenientes de los restos fosilizados de la vida marina. Las formas minerales de carbonato cálcico más abundantes son la piedra caliza, el yeso, la calcita, el gis, la dolomita, la creta y diversos espatos.

Supongamos la descomposición del carbonato cálcico en óxido de calcio y dióxido de carbono.



A. Con ayuda de la tabla de datos termodinámicos, ¿puedes saber si la piedra caliza es o no estable con respecto a su descomposición en cal viva y dióxido de carbono a 25 °C? Justifica tu respuesta.

B. ¿Qué otras conclusiones sobre la reacción puedes extraer de los datos termodinámicos que has manejado?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

La intención educativa de esta actividad es que los alumnos transfieran sus conocimientos sobre Termodinámica Química para elaborar un razonamiento que les permita predecir la estabilidad de la piedra caliza frente a su descomposición en cal viva y dióxido de carbono a 25 ºC.

Se enumeran a continuación las ideas clave que los estudiantes han de desarrollar cuando lleven a cabo esta actividad:

En primer lugar, los alumnos han de identificar el problema a resolver: predecir la estabilidad de un compuesto frente a una reacción de descomposición. O, lo que es lo mismo, que la reacción de descomposición no es termodinámicamente espontánea en las condiciones consideradas.

Es posible que los alumnos conozcan la piedra caliza; de no ser así, se recomienda al docente presentar en el aula una muestra, con el fin de que la identifiquen.

Puede parecer evidente que la piedra caliza no se descompone, a temperatura ambiente, en cal viva y dióxido de calcio; de lo contrario, ¿cómo se explicaría que no se hayan descompuesto los edificios y las estatuas antiguas talladas en piedra caliza? Aquí se plantean dos cuestiones importantes:

Aparece la idea de velocidad de reacción: una reacción espontánea, favorable a suceder, puede no "ser apreciable" si sucede con gran lentitud. Como paradigma de reacción espontánea extremadamente lenta puede citarse la descomposición del diamante en grafito, cuya velocidad es del orden de millones de años. Análogamente, sería posible que la piedra caliza se estuviese descomponiendo, muy lentamente, en dióxido de carbono y óxido de calcio; la lentitud de la reacción explicaría por qué las estatuas y los edificios antiguos continúan en pie. Por ello, no ha de darse por obvio que sea no espontánea una reacción que aparentemente no sucede.

Relacionada con esta idea puede surgir la reacción de descomposición ácida de la piedra caliza. Es posible que algunos alumnos identifiquen esta descomposición ácida con la descomposición térmica; al respecto, el docente especificará que la degradación de las construcciones calcíticas en las ciudades se debe a la acción de múltiples agentes ácidos producidos por la actividad urbana e industrial. Esta descomposición ácida causa daños irreversibles en las estructuras calcáreas, y se observa desde hace años en edificios de gran valor histórico, como el Coliseo de Roma o la Catedral de Burgos.

Una reacción característica del carbonato cálcico en medio ácido es la siguiente:

$$CaCO_{3\,(s)} + H_2SO_{4\,(aq)} \rightarrow CaSO_{4\,(aq)} + CO_{2\,(g)} + H_2O_{\,(l)}$$

Para analizar termodinámicamente la reacción de descomposición térmica de la piedra caliza, ha de establecerse su ecuación química:

$$CaCO_{3\,(s)} \rightarrow CaO_{\,(s)} + CO_{2\,(g)}$$

La intención educativa de esta actividad es que los alumnos sean capaces de extraer una serie de conclusiones sobre una reacción química a partir de la interpretación de los datos termodinámicos tabulados asociados a la reacción.

Para poder utilizar los datos recogidos en las tablas termodinámicas, han de establecerse dos suposiciones previas:

- el sistema objeto de estudio es el sistema reaccionante, compuesto por los reactivos en el estado inicial, y por los productos en el estado final (ello implica suponer, a su vez, que la reacción es cuantitativa);
- la presión permanece constante alrededor del valor p = 1 atm.

Los datos termodinámicos que manejarán los alumnos pueden ser los siguientes:

Tabla 39: datos termodinámicos de la actividad Fi10

Sustancia	***ΔH_f (kJ/mol)***	***S_f (J/mol·K)***
$CO_{2\ (g)}$	-393,5	216,6
$CaO_{\ (s)}$	-635,6	39,8
$CaCO_{3\ (s)}$	-1206,9	92,9

El planteamiento de la actividad no especifica la naturaleza de las relaciones sistema-entorno; el profesor enfatizará en la idea de que, en Química, cualquier sistema reaccionante se considera cerrado, porque aunque la reacción involucre sustancias gaseosas que se emitan a la atmósfera, éstas se consideran parte del sistema.

Dado que esta reacción tiene lugar a temperatura constante (T = 298 K) y presión constante (se ha supuesto p = 1 atm), el criterio de espontaneidad más adecuado es la energía de Gibbs, que permite obviar el estudio del entorno. Así pues, se calculará el valor de ΔG asociada a esta reacción, mediante la ecuación fundamental de la Termodinámica.

Para ello, primero han de conocerse los valores de ΔH y ΔS de la reacción:

$$\Delta H_r = \Sigma[\Delta H_f\,(\text{productos})] - \Sigma[\Delta H_f\,(\text{reactivos})]$$

$$\Delta S_r = \Sigma[S\,(\text{productos})] - \Sigma[S\,(\text{reactivos})]$$

Desarrollando los cálculos:

$$\Delta H_r = \Delta H_f\,[CaO_{\ (s)}] + \Delta H_f\,[CO_{2\ (g)}] - \Delta H_f\,[CaCO_{3\ (s)}] =$$

$$= [(1\text{ mol})\cdot(-635{,}6\text{ kJ/mol}) + (1\text{ mol})\cdot(-393{,}5\text{ kJ/mol})] - [(1\text{ mol})\cdot(-1206{,}9\text{ kJ/mol})]$$

$$\Delta H_r = 177{,}8\text{ kJ}$$

$$\Delta S_r = S_f\,[CaO_{\ (s)}] + S_f\,[CO_{2\ (g)}] - S_f\,[CaCO_{3\ (s)}] =$$

$$= [(1\text{ mol})\cdot(39{,}8\text{ J/mol·K}) + (1\text{ mol})\cdot(213{,}6\text{ J/mol·K})] - [(1\text{ mol})\cdot(92{,}9\text{ J/mol·K})]$$

$$\Delta S_r = +160{,}5\text{ J/K}$$

De los cálculos realizados se extraen las siguientes conclusiones:

La reacción de descomposición de la piedra caliza, a 25 ºC y 1 atm, es una reacción endotérmica. Esto significa que durante la reacción se produce una transferencia neta de energía desde el entorno hacia el sistema. Por otra parte, el valor de ΔS indica que el desorden termodinámico del sistema crece considerablemente durante la reacción. Este dato se confirma contrastando el desorden termodinámico de los estados inicial y final:

Ya se ha comentado que la contribución mayor al desorden termodinámico de un sistema la aporta, sin duda, el estado de agregación de las sustancias que componen los estados inicial y final del sistema. En el caso de esta reacción, este factor resulta decisivo en comparación con cualquiera de las otras contribuciones, puesto que la reacción implica una variación Δn_{gas} = +1 en el número de moles de gas. La producción de 1 mol de gas durante la reacción explica este incremento en el desorden termodinámico del sistema.

Pueden discutirse más factores que influyen en el valor de ΔS de la reacción; no obstante, dado que requieren un cierto conocimiento sobre las características de enlace y estructura de las sustancias químicas implicadas en las reacción, dejamos juicio del docente esta decisión.

Conocidas las variaciones de entalpía y de entropía de la reacción, la variación de la energía de Gibbs se calcula según la ecuación fundamental de la Termodinámica:

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T \cdot \Delta S_r$$

$$\Delta G_r = 177{,}8 \text{ kJ} - (298 \text{ K}) \cdot (160{,}5 \text{ J/K}) \cdot (1\text{kJ}/1000 \text{ kJ}) = 130{,}0 \text{ kJ}$$

$$\Delta G_r > 0$$

El signo positivo de ΔG_r indica que la reacción de descomposición térmica de la piedra caliza no es termodinámicamente espontánea a 25 ºC (298 K). De aquí se concluye que la piedra caliza es estable con respecto a su descomposición térmica a temperatura ambiente y presión atmosférica.

La conclusión general que se extrae del análisis termodinámico realizado es que, en las condiciones consideradas, la piedra caliza no tiende a descomponerse en cal viva y dióxido de carbono.

Llegados a esta conclusión, mediante la siguiente actividad de aplicación se pide a los alumnos que utilicen los conceptos y relaciones termodinámicas para conocer a partir de qué temperatura se hace espontánea la descomposición de la piedra caliza en un horno.

Actividad Fi11: piedra caliza (II) – descomposición térmica

En la actividad *Fp10*, los alumnos comprobaron que la descomposición térmica de la piedra caliza es no espontánea a 25 ºC y 1 atm (ΔG_r = 130,0 kJ). Mediante esta actividad, se determina a partir de qué valores de temperatura es espontánea.

El sistema reaccionante objeto de estudio es el mismo que se consideró en la actividad anterior. Se supondrán, asimismo, las mismas condiciones de presión constante en el valor p = 1 atm.

Para conocer el rango de temperatura (absoluta) en el cual la piedra caliza se hace inestable con respecto de su descomposición térmica, se recurrirá al criterio ΔG_r:

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T \cdot \Delta S_r$$

La reacción sucederá espontáneamente a partir del valor de temperatura para el cual ΔG_r se anula. Para realizar los cálculos, ha de suponerse que los valores de ΔH_r y ΔS_r permanecen constantes en cualquier rango de temperaturas (por otra parte, tampoco se suele disponer de datos termodinámicos tabulados para T alejadas de la ambiente).

Esta reacción es endotérmica (ΔH_r = +177,8 kJ), y la variación de entropía asociada a ella es positiva (ΔS_r = +160,5 J/K). Por tanto, en el horno se debe alcanzar un valor de

temperatura lo suficientemente elevado como para que el valor absoluto del término [$-T \cdot \Delta S_r$] supere el valor absoluto del término entálpico.

Tabla 40: Guion de la actividad Fp11 – piedra caliza (II) – descomposición térmica

Actividad *Fi11*: piedra caliza (II) – descomposición térmica

En la actividad anterior comprobaste que la reacción de descomposición del carbonato cálcico en óxido de calcio y dióxido de carbono no es termodinámicamente espontánea a temperatura ambiente.

$$CaCO_{3\ (s)} \leftrightarrows CaO_{\ (s)} + CO_{2\ (g)}$$

Una de las primeras reacciones conocidas por el ser humano es precisamente la descomposición térmica (calcinación) de la piedra caliza… a altas temperaturas en horno abierto. De esta reacción se libera dióxido de carbono gaseoso y se obtiene óxido de calcio, CaO, comúnmente conocido como cal viva.

La cal viva tiene importantes aplicaciones industriales: en la fabricación del papel, en el tratamiento de aguas afectadas por la lluvia ácida, y en el control de la contaminación por parte de los combustibles fósiles. Además, también se utiliza en la preparación de materiales refractarios (como ciertos vidrios) y en la metalurgia del acero, para eliminar las impurezas que acompañan al mineral de hierro.

A. ¿Qué temperatura tendría que alcanzar un horno para poder llevar a cabo, a escala industrial, la calcinación de la piedra caliza?

B. A la hora de realizar los cálculos, te has basado en datos termodinámicos tabulados para condiciones de T ambiente. ¿Son válidos estos datos para calcular el valor de variables termodinámicas en condiciones de T alejadas de la temperatura ambiente? Justifica tu respuesta.

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Desarrollando los cálculos:

$$0 = \Delta H_r - T\Delta S_r$$

Por tanto: $T = \Delta H_r / \Delta S_r = (177{,}8\ \text{kJ}) \cdot (1000\ \text{J/kJ}) / (160{,}5\ \text{J/K}) = 1108\ \text{K}$

$T = 1108$ K es el valor para el cual se verifica que $|-T\Delta S_r| = |\Delta H_r|$. Para valores de temperatura tales que $T > 1108$ K, las condiciones iniciales del sistema reaccionante son tales que la reacción se hace espontánea ($\Delta G_r < 0 \Leftrightarrow |-T\Delta S_r| > |\Delta H_r|$).

De todo ello se concluye que la reacción de descomposición térmica de la piedra caliza es espontánea, a p atmosférica, a $T > 835$ ºC. Solamente en estas condiciones de altas temperaturas, el sistema adquiere la suficiente energía como para satisfacer la cuota entrópica y seguir disponiendo de energía útil que transferir, puesto que $\Delta H > 0$.

Se pretende, además, que los alumnos discutan el límite de aplicabilidad de los datos termodinámicos tabulados que se refieren a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. Los cálculos realizados con estos datos, ¿pueden extrapolarse al estudio de los procesos que suceden a temperaturas alejadas de las condiciones de T ambiente?

Uno de los supuestos que se han establecido para poder aplicar la ecuación fundamental, es que los valores de ΔH_r y ΔS_r permanecen constantes con la temperatura. No obstante, las variables entalpía y entropía dependen de la temperatura (ver actividad *Fp13*, secuencia *Termoquímica*; y actividad *Fi06*, secuencia *Termodinámica Química*).

En el estudio de los sistemas químicos se parte del supuesto de que las variaciones de entalpía y de entropía no varían apreciablemente con la temperatura. La aplicabilidad de esta aproximación se justifica porque el intervalo de temperaturas considerado en Química solamente abarca unos pocos cientos de Kelvin, en lo que constituye el rango de estabilidad de las sustancias químicas (y, por tanto, de sus enlaces). La única alteración significativa en el valor de las propiedades estructurales de las sustancias químicas ya está contemplada en las tablas termodinámicas: existen datos tabulados de ΔH y de S para las sustancias químicas en los diferentes estados de agregación estables para cada sustancia.

Así, se considerará válida la suposición de que no varían con T los valores de ΔH y ΔS asociados a un proceso químico. El docente recordará que las variables de estado ΔH y ΔS dependen de la variable temperatura; y enfatizará también en la idea de que la suposición aquí considerada es fiable, pero no por ello deja de ser una aproximación.

Actividad Fi12: piedra caliza (III) – el proceso de calcinación

La intención educativa de esta actividad es que el alumnado aplique y reestructure los conceptos y relaciones que se han hecho explícitas durante las dos actividades anteriores. Se pretende que los estudiantes hagan útiles estas ideas para describir el comportamiento de la piedra caliza en un horno cuya temperatura se eleva desde la temperatura ambiente hasta los 1000 ºC.

Tabla 41: Guion de la actividad Fp12 – piedra caliza (III) – el proceso de calcinación

Actividad *Fi12*: piedra caliza (III) – el proceso de calcinación

En un horno industrial cerrado, inicialmente a temperatura ambiente, se introduce piedra caliza. Se enciende el horno y se deja subir la temperatura hasta que en su interior se alcanzan temperaturas cercanas a 1000 °C. En ese momento se apaga el horno.

A. Describe qué le sucede a la piedra caliza en el horno desde que éste se enciende, y hasta que se apaga.

B. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Si se consideran válidas todas las suposiciones desarrolladas en las actividades anteriores, se concluye que la reacción de descomposición del carbonato cálcico no es espontánea a temperaturas inferiores los 1108 K, y se hace espontánea cuando la temperatura sobrepasa los 1108 K.

Ahora bien, el hecho de que ΔG_r tenga un valor positivo a T < 1108 K no significa que la reacción no tenga lugar a T inferiores. La noción de reacción química se relaciona aquí con la noción de reactividad química: a cualquier temperatura, la piedra caliza es reactiva con respecto a su descomposición térmica en óxido de calcio y dióxido de carbono. Sin embargo, cualquier reacción necesita satisfacer dos requisitos para suceder:

- Viabilidad termodinámica: la reacción ha de ser espontánea.
- Viabilidad cinética: ha de ser lo suficientemente rápida para que sea apreciable; una reacción espontánea muy lenta se percibe al cabo de años, siglos…

Otra condición cinética: ha de sobrepasarse el valor de la energía de activación; pero quizá este momento de la intervención sea temprana para introducir estas relaciones.

A través del valor de ΔG_r se puede interpretar la evolución del sistema reaccionante desde los 298 K hasta los 1273 K:

- A temperaturas inferiores a los 1108 K, el signo de ΔG_r es negativo. Aunque la reacción de descomposición es no espontánea, realmente la piedra caliza ya ha comenzado a descomponerse, porque es reactiva también a bajas temperaturas. La descomposición no resulta detectable en estas condiciones, debido a que muy pocas moléculas de $CaCO_3$ llegan a descomponerse. De hecho, la producción de CO_2 solamente se hace medible a temperaturas cercanas a los 970 K. A medida que la temperatura se acerca a los 1108 K, la presión de CO_2 se aproxima a 1 atm.
- Cuando la T del horno asciende a 1108 K, el sistema reaccionante alcanza el estado de equilibrio, en el que la presión de equilibrio del CO_2 tiene el valor de 1 atm.
- A T > 1108 K, la reacción es espontánea. Esto significa que la descomposición afecta a un número significativo de moléculas de $CaCO_3$. A medida que aumenta T, la presión de equilibrio del CO_2 sobrepasa rápidamente 1 atm (ver *Figura 12*).

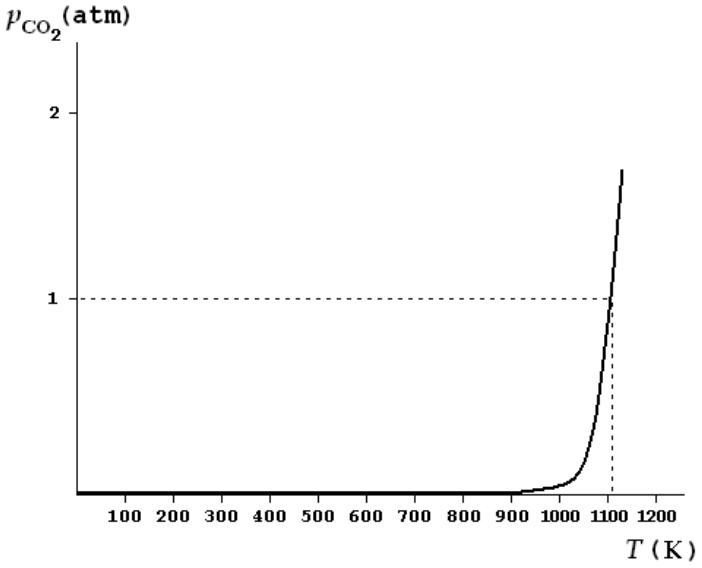


Figura 12: presión de CO_2 dentro del horno de la actividad Fi12

En la práctica, esta reacción pirolítica puede considerarse "reversible", atendiendo a la elevada reactividad de los productos en estas condiciones de temperatura: el CaO reacciona fácilmente con el CO_2 liberado para formar $CaCO_3$. Por ello, durante el proceso industrial de descomposición térmica de la piedra caliza se retira constantemente el CO_2 del horno, con el fin de evitar la formación de grandes cantidades de carbonato cálcico a partir de los productos de la calcinación.

Actividad Fi13: un poco de Termodinámica para la metalurgia

La intención educativa de esta actividad es que los alumnos apliquen los conceptos y las relaciones termodinámicas a la elección de la mena mineral más conveniente para obtener hierro metálico por reducción pirometalúrgica.

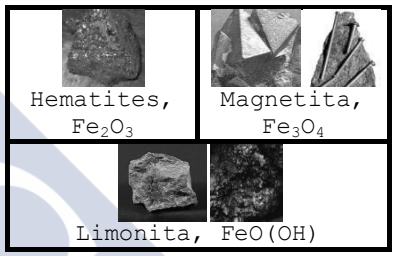
Tabla 42: Guion de la actividad Fp13 – un poco de Termodinámica para la metalurgia

Actividad *Fi13*: un poco de Termodinámica para la metalurgia

Entre todos los elementos químicos, el hierro ocupa el cuarto lugar en abundancia en la corteza terrestre; es, además, el segundo metal más abundante, después del aluminio.

Se considera que el núcleo terrestre está compuesto fundamentalmente de hierro y de níquel, y la presencia de grandes cantidades de hierro en numerosos meteoritos hace suponer que este metal abunda en todo el sistema solar.

Los minerales más importantes de hierro son la hematita o hematites, la magnetita y la limonita.



A. Utilizando la tabla de datos termodinámicos, calcula la temperatura mínima a la que es posible reducir el hierro trivalente de la hematites a hierro metálico haciendo reaccionar el mineral con carbono.

B. ¿A partir de qué temperatura puede reducirse a hierro la magnetita por el mismo procedimiento pirometalúrgico?

C. Si tuvieras que elegir un óxido de hierro como mena (materia prima mineral) para obtener hierro a escala industrial, ¿de qué mineral partirías: hematites o magnetita? Justifica tu respuesta.

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Las principales ideas clave que se pretenden desarrollar son las siguientes:

La actividad comienza proponiendo a los alumnos el análisis termodinámico de dos reacciones de reducción pirolítica de óxidos metálicos. Los conceptos y las destrezas que se podrán en juego para conocer la temperatura mínima a la que se ven favorecidas cada una de estas dos reacciones, son las mismas que se han descrito en el desarrollo de la actividad *Fi12*.

Esta actividad se centra en la reducción pirometalúrgica de dos de los minerales de hierro más abundantes. Es posible que los estudiantes ya conozcan estos óxidos de hierro,

bien a través de su experiencia cotidiana, de los medios de comunicación o del contexto del aula de ciencias. En todo caso, recomendamos al docente que presente al alumnado algunas muestras de estos minerales, o que los relacione con la experiencia diaria de los alumnos: la hematites presenta una variedad de colores bastante característica, y la magnetita es más conocida como "piedra imán".

Los datos termodinámicos que manejarán los alumnos pueden ser los siguientes:

Tabla 43: datos termodinámicos de la actividad Fi13

Sustancia	***ΔH_f (kJ/mol)***	***S_f (J/mol·K)***
$C_{(s)}$	0	5,7
$CO_{2\ (g)}$	-393,5	213,7
$Fe_{(s)}$	0	27,3
$Fe_2O_{3\ (s)}$	-824,2	87,4
$Fe_3O_{4\ (s)}$	-1118,4	146,4

Análisis termodinámico de la reducción del mineral hematites:

Esta reacción se describe mediante la siguiente ecuación:

$$Fe_2O_{3\ (s)} + 3/2\ C_{(s)} \rightarrow 2\ Fe_{(s)} + 3/2\ CO_{2\ (g)}$$

Desarrollando los cálculos:

$$\Delta H_r = 3/2\ \Delta H_f [CO_{2\ (s)}] - \Delta H_f [Fe_2O_{3\ (s)}] =$$

$$= [(3/2\ mol) \cdot (-393{,}5\ kJ/mol)] - [(1\ mol) \cdot (-824{,}2\ kJ/mol)] = +234{,}0\ kJ$$

La reacción es endotérmica.

$$\Delta S_r = 3/2\ S_f [CO_{2\ (g)}] + 2\ S_f [Fe_{(s)}] - 3/2\ S_f [C_{(s)}] - S_f [Fe_2O_{3\ (s)}] =$$

$$= [(3/2\ mol) \cdot (213{,}7\ J/mol \cdot K) + (2\ mol) \cdot (27{,}3\ J/mol \cdot K)] +$$

$$- [(3/2\ mol) \cdot (5{,}7\ J/mol \cdot K) + (1\ mol) \cdot (87{,}4\ J/mol \cdot K)] = +279{,}2\ J/K$$

La generación de 1,5 mol de gas por cada mol de óxido de hierro reaccionante es la principal contribución al aumento del desorden termodinámico del sistema.

El mínimo valor de T para la cual la reacción es espontánea se calcula como:

$$\Delta G_r = 0 \Leftrightarrow \qquad T = \Delta H_r / \Delta S_r = [(234{,}0\ kJ) \cdot (1000\ J/kJ)] / (279{,}2\ J/K) = 838\ K$$

Dado que la reacción es endotérmica y presenta una variación de entropía positiva, solamente será espontánea a temperaturas superiores a los 838 K (565 ^oC); a temperaturas inferiores a los 838 K, la reacción no se observará a nivel macroscópico.

Análisis termodinámico de la reducción del mineral magnetita:

Esta reacción se describe mediante la siguiente ecuación:

$$Fe_3O_{4\ (s)} + 2\ C_{(s)} \rightarrow 3\ Fe_{(s)} + 2\ CO_{2\ (g)}$$

Desarrollando los cálculos:

$$\Delta H_r = 2\ \Delta H_f\ [CO_{2\ (s)}] - \Delta H_f\ [Fe_3O_{4\ (s)}] =$$

$$= [(2\ mol) \cdot (-393{,}5\ kJ/mol)] - [(1\ mol) \cdot (-1118{,}4\ kJ/mol)] = +331{,}4\ kJ$$

Esta reacción también es endotérmica.

$$\Delta S_r = 2\ S_f\ [CO_{2\ (g)}] + 3\ S_f\ [Fe_{\ (s)}] - 2\ S_f\ [C_{\ (s)}] - S_f\ [Fe_3O_{4\ (s)}] =$$

$$= [(2\ mol) \cdot (213{,}7\ J/mol \cdot K) + (3\ mol) \cdot (27{,}3\ J/mol \cdot K)] +$$

$$- [(2\ mol) \cdot (5{,}7\ J/mol \cdot K) + (1\ mol) \cdot (146{,}4\ J/mol \cdot K)] = +351{,}1\ J/K$$

La generación de 2 mol de gas por cada mol de magnetita reaccionante es la principal contribución al aumento del desorden termodinámico del sistema.

Para conocer el valor de *T* a partir de la cual la reacción será espontánea:

$$\Delta G_r = 0 \Leftrightarrow \qquad T = \Delta H_r\ /\ \Delta S_r = [(331{,}4\ kJ) \cdot (1000\ J/kJ)]\ /\ (351{,}1\ J/K) = 944\ K$$

Dado que la reacción, endotérmica, presenta una variación de entropía positiva, solamente será espontánea a temperaturas superiores a los 944 K (671 ºC); a temperaturas inferiores a los 944 K, la reacción no se observará a nivel macroscópico.

En resumen, los valores de temperatura mínimos para realizar la reducción térmica de estos minerales de hierro son:

$$Fe_2O_{3\ (s)} + 3/2\ C_{\ (s)} \rightarrow 2\ Fe_{\ (s)} + 3/2\ CO_{2\ (g)} \qquad T = 838\ K$$

$$Fe_3O_{4\ (s)} + 2\ C_{\ (s)} \rightarrow 3\ Fe_{\ (s)} + 2\ CO_{2\ (g)} \qquad T = 944\ K$$

Mediante esta actividad se pretende que los alumnos hagan útiles sus conocimientos para obtener conclusiones científicamente fundamentadas que les sirvan de base a la hora de decidir el óxido de hierro que elegirían como materia prima mineral en la producción pirometalúrgica de hierro.

Los minerales utilizados como mena en la industria siderúrgica son de tipo sulfurado (pirita, calcopirita…) y oxidado (hematites, magnetita…; también los oxohidróxidos goethita, limonita y lepidocrocita). Otros minerales importantes de hierro son la siderita (carbonato de hierro), la ilmenita (óxido de hierro y titanio) y el mispíquel (arsenopirita, sulfuro mixto de hierro y arsénico).

Se organizará un debate, en gran grupo, para elegir uno de los dos minerales propuestos (hematites o magnetita) como mena para la obtención de hierro a escala industrial. Con esta estrategia se busca que el alumnado reflexione sobre la idea de que un dato numérico (por ejemplo, la temperatura mínima de reducción de un mineral), no debe convertirse en el único factor que determine la elección de una sustancia química como materia prima o, en general, como recurso material. Se trata de que al alumnado defienda, mediante la argumentación, sus decisiones basadas en una serie de criterios en función de los cuales decidirán, entre varias sustancias químicas, cuál resulta óptima para una determinada finalidad, uso o aplicación. Esta actividad, de planteamiento similar al de la actividad *Fp14* de la secuencia *Termoquímica*, enfrenta a los alumnos a un problema abierto

cuya resolución requiere analizar más allá de los aspectos energéticos de las reacciones químicas, e integrar conceptos que proceden de diversas áreas de conocimiento y que se relacionan con diversos aspectos CTS:

- Criterios termodinámicos: Para elegir uno de estos dos óxidos como mena en la producción industrial de hierro, ha de considerarse, en primer lugar, la temperatura mínima a la que se hace viable la reducción pirometalúrgica. Este dato se obtiene a partir de los cálculos termodinámicos, de los cuales se concluye que el mineral más adecuado para la obtención de hierro metálico sería la hematites, cuya temperatura mínima de reducción térmica es menor que la de la magnetita. No obstante, han de evaluarse más factores, además del coste energético del proceso metalúrgico.
- Disponibilidad del mineral: También la abundancia y la disponibilidad del mineral son un criterio importante. Dado que tanto hematites como magnetita se encuentran en multitud de yacimientos conocidos y explotados, en este caso puede considerarse que este factor no es decisivo.
- Propiedades físicas y químicas del mineral: En particular, las interesantes propiedades magnéticas de la magnetita son aprovechables para muchas y muy diversas finalidades. Este hecho puede ayudar a elegir la hematites como mena para obtener hierro por métodos pirometalúrgicos.
- Aspectos relacionados con el impacto ambiental del proceso industrial: Influirá considerablemente en la decisión la cantidad de residuos generados en el proceso industrial, con especial atención a los residuos contaminantes. En este caso, el tratamiento pirometalúrgico de los minerales oxidados genera considerables cantidades de CO_2, gas responsable del efecto invernadero. En el tratamiento pirometalúrgico de la hematites, se generan 0,75 mol de CO_2 por cada mol de hierro obtenido. En cambio, en la reducción de la magnetita, cada mol de hierro obtenido se acompaña de la producción de 0,67 mol de CO_2. Este hecho se debe a que la hematites, mineral de hierro trivalente, contiene mayor proporción de oxígeno que la magnetita, de la que un ~31% del hierro se halla en el estado de oxidación Fe(II).

Realizadas todas estas observaciones, se concluye que existe un único inconveniente de elegir la hematites como mena para la obtención industrial de hierro: su reducción térmica es más contaminante que la reducción de la magnetita. Mediante la posterior captación del CO_2 emitido, podría paliarse en gran medida este problema. En este sentido, se destacará el papel de las plantas y las algas verdes en la reconversión del CO_2. Se insistirá en la urgencia de preservar y recuperar tanto la masa forestal como las grandes poblaciones de algas, que además de intervenir en el mantenimiento de la composición química de la atmósfera, mantienen el equilibrio de los ecosistemas terrestres y acuáticos.

La reflexión que se pretende promover va más allá de la elección de uno de estos minerales como mena de hierro: se trata de analizar las ventajas e inconvenientes de los métodos pirometalúrgicos y las alternativas que se encuentran disponibles en la actualidad para la obtención de hierro.

La pirometalurgia del hierro es, junto con la minería del carbón, uno de los grandes paradigmas de la explotación industrial. En los procedimientos de la industria pirometalúrgica, el procesado de las menas oxidadas de hierro comienza con la separación de la mena y la ganga por diversos métodos: trituración, flotación… A continuación se procede a la reducción térmica del mineral, por tratamiento con carbono. Posteriormente a este tratamiento térmico, existen variedad de procesos de purificación y refino del hierro, adecuados a la pureza que se desee obtener.

La gran contrapartida de los métodos pirometalúrgicos es, sin duda, la contaminación producida por la combustión del carbón, que genera toneladas CO_2. En el caso de los minerales sulfurados, además de CO_2, la tostación del mineral a altas temperaturas produce grandes cantidades de SO_2, gas responsable de la lluvia ácida.

Para solucionar estos problemas, desde hace décadas se han propuesto métodos hidrometalúrgicos que sustituyan a la reducción térmica de la pirometalurgia. Hoy en día, las alternativas consideradas viables consisten en la lixiviación química de la mena en condiciones extremadamente ácidas; se han propuesto también métodos basados en la biolixiviación de los minerales sulfurados por parte de bacterias termoacidófilas cuyo metabolismo las hace capaces de fijar azufre.

A pesar de las investigaciones desarrolladas, en la actualidad las alternativas hidrometalúrgicas presentan dos inconvenientes trascendentales: por un lado, los procedimientos de lixiviación son notablemente lentos en comparación con la reducción térmica de los métodos pirometalúrgicos; por otra parte, las aguas de lixiviación requieren la implantación de instalaciones adecuadas para su seguro almacenamiento y su posterior tratamiento, lo que a su vez exigiría considerables innovaciones técnicas en la industria.

El reciclaje y la reutilización del hierro contenido en materiales desechados es una alternativa que no hay que desdeñar. En relación con esta idea se fomentarán las actitudes de consumo responsable y gestión adecuada de los bienes de consumo.

Actividad Fi14: la termodinámica de las explosiones

Se trata de una actividad de aplicación en la que nuevamente se pretende que el alumnado relacione los aspectos termodinámicos de un proceso químico con los aspectos estructurales de la materia.

Por otra parte, se presentan a los alumnos las explosiones químicas, reacciones que suceden a altísimas velocidades. La imposibilidad de conocer la velocidad de los procesos desde el punto de vista termodinámico servirá de base para relacionar la Termodinámica Química con la Cinética Química.

Con esta actividad se pretende que los alumnos elaboren una descripción detallada de las reacciones conocidas como "explosiones químicas".

La mayoría de las reacciones químicas tiene lugar en un número discreto e identificable de etapas. Para cada una de ellas, casi siempre puede determinarse su viabilidad, su velocidad, sus condiciones de equilibrio y su mecanismo. Pero las explosiones son una extraordinaria excepción: tienen lugar en un número indefinido de etapas en cadena. Sus parámetros cinéticos y de equilibrio resultan complicados de calcular, y sus mecanismos apenas se conocen. En todo caso, se trata de reacciones complejas y extraordinariamente rápidas, que se caracterizan por la fragmentación de las moléculas de los reactivos y su rápida recombinación en productos finales que son, por lo general, gases muy estables. El resultado de este proceso es una liberación casi instantánea de grandes cantidades de gas a altas temperaturas. Estos gases expanden a velocidades del orden de 9000 m/s y generan presiones de hasta 700.000 atm, lo cual crea una gran onda expansiva que causa una enorme devastación en las inmediaciones.

Tabla 44: Guion de la actividad Fp14 – la termodinámica de las explosiones

Actividad *Fi14*: la termodinámica de las explosiones

Las explosiones químicas son reacciones que suceden a altísimas velocidades y mediante mecanismos muy complejos. Se caracterizan por la ruptura espontánea de moléculas en varios fragmentos. La inmediata consecuencia de esta fragmentación molecular es la generación casi instantánea de una gran onda expansiva capaz de viajar a velocidades de 9000 m/s y generar una presión de hasta 700.000 atm, causando una enorme devastación física en los alrededores.

Uno de los explosivos más famosos es la dinamita, perfeccionada en 1865 por el científico sueco A. Nobel. La dinamita actual es una mezcla terrosa de nitrato amónico y nitroglicerina.

Otro explosivo famoso es el TNT (trinitrotolueno), conocido también como "trilita". Además, existen numerosos "explosivos plásticos", como el PETN (tetranitrato de pentaeritritol), de fórmula $(O_2NOCH_2)_4C$.

A. De acuerdo con las estructuras químicas de la nitroglicerina, el TNT y el PETN, ¿a qué atribuirías su carácter explosivo?

B. ¿Cómo describirías las explosiones desde el punto de vista termodinámico?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Esta descripción se estructura en tres componentes fundamentales:

La primera de ellas, una breve visión general de las características de la reacción, se le ofrece al alumnado en el propio texto de la actividad. El texto también menciona varios de los explosivos más conocidos. El análisis de este texto permitirá introducir la distinción entre los ámbitos de estudio de la Cinética, la Termodinámica, el Equilibrio y la Mecanística de las reacciones químicas.

A continuación, se pide a los estudiantes que justifiquen el carácter explosivo de tres compuestos (nitroglicerina, TNT y PETN) atendiendo a su estructura química. El objetivo de esta cuestión es que los alumnos utilicen sus conocimientos sobre los modelos de estructura y enlace de la materia para complementar la descripción inicial sobre las explosiones químicas con una nueva perspectiva: las causas microscópicas que explican las características más generales de estas reacciones.

Posteriormente, los alumnos movilizarán sus conocimientos para construir una descripción termodinámica de estas reacciones. La actividad finalizará con la revisión de todas las ideas surgidas en el aula, con el fin de que los estudiantes perciban que la integración de todas las perspectivas desarrolladas dota de mayor poder descriptivo y explicativo a los argumentos científicos.

El docente ayudará a los alumnos a analizar el tipo de información que aporta la Termodinámica al estudio de las reacciones químicas, y qué tipo de información procede de otros campos de conocimiento de la Química. Se trata de que el alumnado sea consciente de las contribuciones teóricas de las distintas disciplinas químicas, y que a través de esta conciencia valore el carácter global e integrador de la Química.

Existen numerosas familias de sustancias químicas explosivas. Sin embargo, los compuestos que forman parte de todas y cada una de ellas presentan diversas similitudes en cuanto a sus propiedades físicas y, sobre todo, químicas. Por lo general, se trata de compuestos orgánicos ligeros (de baja masa molecular). A temperatura y presión ambiente, casi todos los explosivos se presentan en forma condensada, por lo general en estado sólido; la excepción más notable es la nitroglicerina, líquida en condiciones ambientales.

Uno de los primeros explosivos nitrados comercializados fue la dinamita. La dinamita industrial actual consiste en una mezcla de nitroglicerina y nitrato amónico absorbidos en tierra.

Otro explosivo nitrado de gran potencia es el TNT (trinitrotolueno, más conocido como "trilita"), cuya baja sensibilidad al impacto y una buena estabilidad lo capacitan como explosivo útil para fines militares. Hoy día existen también polímeros explosivos, a los que se suele denominar bajo el nombre genérico de "explosivos plásticos". Entre ellos, mencionaremos el PETN (tetranitrato de pentaeritritol).

Dependiendo de su sensibilidad al choque, los explosivos se clasifican en primarios y secundarios. Los explosivos primarios, más sensibles, se incluyen en dispositivos como detonadores, cápsulas explosivas y misiles, para iniciar la explosión de los explosivos secundarios, menos sensibles a la temperatura y al choque que los primarios. En general, los explosivos secundarios arden cuando se les somete a ignición al aire, y por tanto, resultan más fáciles de manufacturar y transportar; su detonación requiere, en casi todos los casos, la explosión cercana de un explosivo primario.

En esta actividad, se pretende que los alumnos justifiquen estas características de las explosiones químicas mediante el análisis de las similitudes estructurales que se verifican entre tres de los compuestos explosivos más conocidos: TNT, nitroglicerina y PETN (ver *Figura 13*).

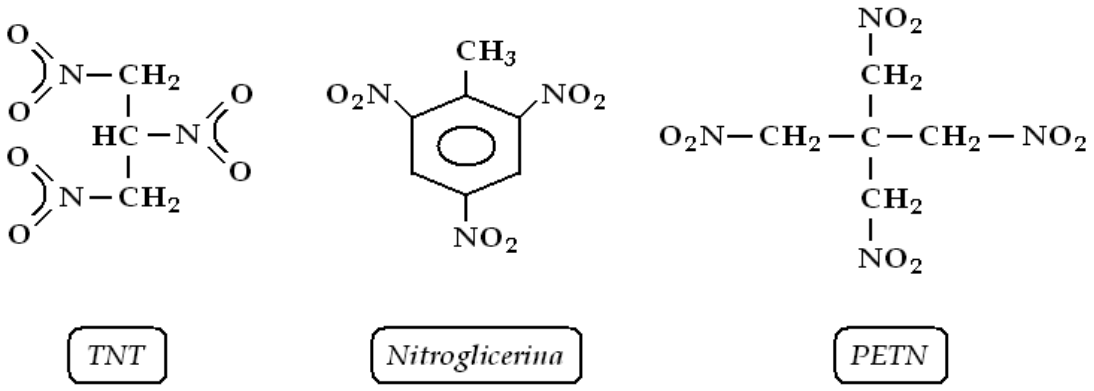


Figura 13: estructuras moleculares del TNT, la nitroglicerina y el PETN

Las estructuras de estas tres sustancias son similares en varios aspectos: se trata de tres compuestos orgánicos de bajo peso molecular, que contienen varios grupos funcionales nitro. Las explosiones químicas relacionadas con estos tres compuestos suponen la ruptura de prácticamente todos los enlaces de los reactivos, y dan lugar a una serie de gases: CO_2, N_2, H_2, O_2…

Se puede establecer, pues, una generalización sobre la estructura de las sustancias explosivas: la característica primordial de cualquier sustancia explosiva es que su rápida ignición libere en pocos segundos un gran volumen de gas a elevadas temperaturas. Para que las reacciones sean tan exotérmicas, se requiere que los reactivos contengan grupos funcionales cuya rápida reorganización los libere del esqueleto molecular con la formación de enlaces altamente estables ($\Delta H << 0$) en productos gaseosos ($\Delta S >> 0$). El gas diatómico más estable es el N_2 (N≡N). Por ello, los explosivos más eficaces contienen grupos funcionales nitro unidos a un pequeño esqueleto carbonado.

La descripción termodinámica de las explosiones químicas deriva de estas ideas:

Termodinámicamente, las explosiones químicas destacan por su elevada exotermia y el gran grado de desorden termodinámico que adquiere el sistema reaccionante durante la explosión. Estas dos características justifican que las explosiones químicas sean termodinámicamente espontáneas en un amplio rango de temperaturas. Para estabilizar una sustancia explosiva, pues, debe evitarse toda agitación (mecánica, térmica…); ha de guardarse en lugar frío y estable.

Finalmente, se resumirán todas las ideas desarrolladas durante la actividad. Con ello se pretende que los alumnos sean conscientes de las limitaciones de las distintas disciplinas (Cinética, Termodinámica) y de las distintas perspectivas (macroscópica,

microscópica). Se subrayará la importancia de integrar y complementar las ideas científicas con el desarrollo de nuevos constructos que le aporten de mayor poder descriptivo, explicativo y predictivo.

Las dos últimas actividades de la secuencia *Termodinámica Química*, como se ha mencionado ya, abordan nuevos conceptos relacionados con los aspectos cinéticos y de equilibrio de las reacciones químicas.

Actividad Fi15: la síntesis de Haber

Esta actividad de aplicación tiene por objetivo la integración de los aspectos termodinámicos y cinéticos de las reacciones químicas. Con este fin, se enfrenta a los alumnos a la necesidad de buscar unas condiciones adecuadas para producir amoníaco a escala industrial mediante la síntesis de Haber. Este ejemplo permite introducir la catálisis como una de las soluciones industriales más provechosas a la hora de forzar a suceder apreciablemente ciertos procesos espontáneos, pero extremadamente lentos.

Tabla 45: Guion de la actividad Fp15 – la síntesis de Haber

Actividad *Fi15*: la síntesis de Haber

El químico alemán F. Haber (Premio Nobel de Química en 1918) fue el impulsor la síntesis del amoníaco a partir de dos gases muy abundantes: nitrógeno e hidrógeno. Con el proceso Haber, muy eficaz para producir abonos nitrogenados a gran escala, Alemania experimentó un espectacular aumento de su producción agrícola. Sin embargo, el logro científico de Haber también abasteció a su país para la fabricación de explosivos durante la 1ª Guerra Mundial.

Al acabar la 1ª Guerra Mundial, los aliados declararon a Haber criminal de guerra por sus investigaciones sobre gases tóxicos. Tras años de huida, Haber volvió a Alemania, de donde se vería obligado nuevamente a huir por la persecución de Hitler a los judíos (Haber profesaba la religión judía). Murió en el exilio en 1934, diez años antes de que uno de sus experimentos, bajo el nombre de Zyclon-B, fuese utilizado como gas de exterminio en los campos de concentración nazis.

El proceso Haber, a escala industrial, se realiza a altas presiones (100 – 1000 atm) y altas temperaturas (entre 400 y 550 °C) en presencia de un catalizador.

A. Escribe la reacción en la que se basa el proceso Haber de síntesis del amoníaco. En condiciones de T y p atmosférica, ¿es esta reacción termodinámicamente espontánea?

B. Esta reacción es extremadamente lenta a temperatura ambiente. ¿Qué condiciones aconsejarías para mejorarla, y por qué?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Se enumeran a continuación las ideas clave que se tratan mediante esta actividad:

La síntesis del amoníaco a partir de sus elementos representa uno de los grandes hallazgos científicos del siglo XX, tanto por su aportación al desarrollo de la agricultura,

como por la innovación que supuso en su época la utilización de un catalizador para superar los impedimentos cinéticos de una reacción que es espontánea, pero demasiado lenta como para resultar rentable a la industria química.

La idea de sintetizar amoníaco a partir de sus elementos se remonta al siglo XIX, cuando se generalizó la búsqueda de una vía de síntesis capaz de llevar a cabo una reacción aparentemente sencilla y a partir de dos gases tan abundantes como nitrógeno e hidrógeno. Esta reacción garantizaba un abastecimiento inagotable de amoníaco, y prometía grandes beneficios económicos:

$$N_{2\,(g)} + 3\,H_{2\,(g)} \rightarrow 2\,NH_{3\,(g)}$$

Un análisis termodinámico de esta reacción nos permitirá emitir diversas conclusiones sobre las condiciones adecuadas para llevar a cabo la síntesis directa del amoníaco a escala industrial.

Los datos termodinámicos que manejarán los alumnos pueden ser los siguientes:

Tabla 46: datos termodinámicos de las sustancias implicadas en la reacción de Haber

Sustancia	***ΔH_f (kJ/mol)***	***S_f (J/mol·K)***
$H_{2\,(g)}$	0	213,6
$N_{2\,(g)}$	0	92,9
$NH_{3\,(g)}$	-46,3	193,0

$$\Delta H_r = 2 \cdot \Delta H_f\,[NH_{3\,(g)}] = [(2\text{ mol}) \cdot (-46{,}3\text{ kJ/mol})] = -92{,}6\text{ kJ}$$

Se trata de una reacción ligeramente exotérmica.

$$\Delta S_r = 2 \cdot S\,[NH_{3\,(g)}] - 3 \cdot S\,[H_{2\,(g)}] - S\,[N_{2\,(g)}] =$$

$$= [(2\text{ mol}) \cdot (193{,}0\text{ J/mol·K})] - [(3\text{ mol}) \cdot (213{,}6\text{ J/mol·K})] - [(1\text{ mol}) \cdot (92{,}9\text{ J/mol·K})] =$$

$$\Delta S_r = -161{,}9\text{ J/K}$$

La variación en el número de moles de gas es $\Delta n_{gas} = -2$. La pérdida de 2 mol de gas supone una gran contribución a la disminución del desorden termodinámico del sistema durante la reacción.

Conocidas las variaciones de entalpía y de entropía, queda por calcular la variación de la energía de Gibbs según la ecuación fundamental de la Termodinámica:

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T \cdot \Delta S_r$$

$$\Delta G_r = -92{,}6\text{ kJ} - (298\text{ K}) \cdot (-161{,}9\text{ J/K}) \cdot (1\text{kJ}/1000\text{ kJ}) = -44{,}4\text{ kJ} \qquad \Delta G_r < 0$$

Del valor negativo de ΔG_r se concluye que la reacción es espontánea a 25 ºC (298 K). No obstante, la reacción es tan extremadamente lenta en estas condiciones, que se considera inviable su realización a escala industrial.

Este planteamiento servirá de base para introducir la siguiente idea: la espontaneidad (Termodinámica) no ofrece información sobre la rapidez (Cinética) con

que el sistema alcanza el equilibrio (Equilibrio). Para poder predecir si una reacción se produce apreciablemente, ha de analizarse también desde el punto de vista cinético.

Se atenderá al diagnóstico de ideas alternativas y dificultades de aprendizaje que relacionan las ideas de equilibrio y de velocidad de reacción con la variable ΔG (Johnstone *et al.*, 1977; Thomas y Schwenz, 1998; Ribeiro *et al.*, 1990; Carson y Watson, 2002; Sözbilir, 2002).

En cuanto a las relaciones alternativas que involucran aspectos cinéticos, quizá la más extendida es la que asigna a ΔG el rol de estimador de la velocidad de las reacciones. Según Johnstone *et al.*, (1977), esta idea alternativa presenta un gran paralelismo con las analogías del mundo macrofísico: cuanto mayor es la altura de la que caen las cosas, más rápido caen; análogamente, cuanta más energía se aporta a un sistema, mayor es la velocidad con la que evoluciona.

En lo relativo al equilibrio químico, Sözbilir (2002) puso de manifiesto una relación alternativa que atribuye a ΔG el rol de estimador de la extensión en que se produce una reacción: "las reacciones con gran ΔG suceden completamente". Sözbilir sugiere que el origen de esta relación alternativa puede deberse a la asociación de dos ideas alternativas: la idea termo-cinética que acabamos de describir (si ΔG es grande, la reacción ocurre rápidamente), y la idea de que, cuando una reacción ocurre rápidamente, sucede completamente.

La mejor estrategia para mejorar la velocidad de la reacción consiste en buscar unas condiciones de presión y temperatura en las cuales la síntesis sea razonablemente rápida, además de termodinámicamente favorable (espontánea).

La velocidad de la reacción aumenta apreciablemente con el aumento de la temperatura y la presión. Pero, ¿en qué rangos de temperatura y presión es espontánea?

La síntesis del amoníaco a partir de sus elementos es un proceso exotérmico que supone una gran disminución en el desorden termodinámico del sistema reaccionante. Por ello, esta reacción es espontánea en condiciones de bajas temperaturas y bajas presiones, en las que la exotermia de la reacción pueda compensar la pérdida de desorden termodinámico. Además, a altas temperaturas se favorece la reacción inversa, que disminuye el rendimiento de conversión. Dado que tanto los reactivos como el producto de la síntesis son gaseosos y miscibles, no es fácil mejorar el rendimiento retirando el producto a medida que se genera.

En este punto de la intervención, dejamos a criterio del docente la posibilidad de introducir la noción de desplazamiento del equilibrio químico, con relación a este proceso. Recomendamos, en todo caso, no aplicar el Principio de Le Châtelier a esta reacción, que constituye una excepción a las normas de aplicación de este Principio.

Del análisis termodinámico realizado se concluye que ha de adoptarse una solución de compromiso: la temperatura óptima para la síntesis no puede ser ni

excesivamente baja (pues la reacción tendría lugar a velocidades muy bajas), ni tan alta que favorezca la reacción inversa. Pero, a *T* y *p* moderadas, es demasiado lenta.

A la vista de estas conclusiones, resulta obvio que la mejor solución al problema pasa necesariamente por la búsqueda de un catalizador que aumente la velocidad de la síntesis en condiciones moderadas de presión y temperatura.

El gran logro de Haber fue precisamente descubrir un catalizador adecuado para esta síntesis. En 1905, tras decenas de pruebas infructuosas, Haber encontró que una mezcla de hierro-α y un pequeño porcentaje de óxidos de potasio y de aluminio es capaz de catalizar la reacción directa de síntesis del amoníaco a presiones de entre 100 y 1000 atm, y temperaturas de 400 a 550 ºC.

Este método de catálisis heterogénea todavía se utiliza hoy en día en la producción de amoníaco a escala industrial.

Actividad Fi16: Termodinámica y Bioquímica

En esta actividad, se pretende que el alumnado construya el concepto bioquímico del acoplamiento entre procesos termodinámicos. Para ello, se le presentan dos procesos químicos que, aunque son termodinámicamente no espontáneos en condiciones fisiológicas, tienen lugar en las células de los organismos vivos.

Mediante esta estrategia se pretende hacer ver a los alumnos una de las aplicaciones más interesantes de la Termodinámica: el estudio de los procesos vitales. Además, las ideas que se desarrollan en esta actividad relacionan los conceptos termodinámicos con conceptos de equilibrio y mecanísticos, y promueven una visión global de los procesos químicos como transformaciones dinámicas.

Las ideas clave en las que se centra esta actividad guardan una estrecha relación con conceptos de la Biología Molecular y, en particular, con la distribución de energía en las células y con la interpretación de las etapas metabólicas como reacciones interdependientes que tienen lugar en las células de los organismos vivos. Por ello, la profundidad con la que se desarrollarán estas ideas dependerá en gran medida de los conocimientos del alumnado sobre estas nociones biológicas.

La actividad comienza planteando el rol tradicional de "almacenamiento de energía" que se atribuía a sustancias como el ATP. El objetivo de este acercamiento a la termodinámica de los procesos metabólicos es que los alumnos cuestionen la idea de que el ATP cuenta con "enlaces de fosfato altamente energéticos" que lo capacitan como "reserva celular de energía". Con esta primera cuestión se pretende explorar las ideas de los estudiantes sobre la naturaleza de los enlaces químicos en un contexto biológico, en el que la noción de enlace químico puede resultar poco evidente para algunos alumnos.

La comunidad científica ha rechazado la idea de que el ATP es una "reserva energética celular": los compuestos no "almacenan energía en sus enlaces". El rol de "*reserva energética*" atribuido al ATP se debe a que esta molécula puede sufrir rupturas

hidrolíticas exotérmicas de grupos fosfato lábiles. La exotermia de estas rupturas de enlaces es la responsable de que se favorezcan intercambios de energía en el medio acuoso inmediato a las moléculas de ATP hidrolizadas. La molécula de ATP solamente se hidroliza en determinadas condiciones (que hacen espontánea la hidrólisis). En estas condiciones, a partir del ATP se forman ADP (difosfato de adenosina) y ácido fosfórico, y la energía liberada en la hidrólisis se invierte en la realización de nuevos procesos. La energía liberada de la hidrólisis del ATP se utiliza para favorecer procesos físicos y reacciones metabólicas que en otras condiciones no serían espontáneas.

Tabla 47: Guion de la actividad Fp16 – Termodinámica y Bioquímica

Actividad *Fi16*: Termodinámica y Bioquímica

Muchos procesos esenciales para la vida no son termodinámicamente espontáneos. Este el caso de reacciones como la síntesis de proteínas a partir de aminoácidos, o la realización de procesos biofísicos como el transporte de sustancias a través de membranas en contra de un gradiente de concentración, la transmisión de impulsos nerviosos, la contracción muscular…

Por otra parte, en los sistemas vivos, las células disponen de sustancias químicas capaces de experimentar reacciones con ΔG muy negativas (para las condiciones fisiológicas). Casi todos estos compuestos tienen enlaces N-P, como es el caso del ATP. La liberación hidrolítica de un grupo fosfato del ATP en disolución acuosa presenta un valor de ΔG = -31 kJ/mol.

En el pasado, los bioquímicos afirmaban que las sustancias como el ATP contenían "enlaces de fosfato altamente energéticos" o "de energía elevada", y que la función del ATP es "almacenar energía" en las células. Actualmente se considera que, en condiciones adecuadas, la hidrólisis del ATP para formar ADP y ácido fosfórico libera energía que puede utilizarse para llevar a cabo reacciones que no son favorables termodinámicamente. A este proceso se le denomina "acoplamiento de reacciones".

A. En la actualidad, se suele denominar a estos compuestos "lanzaderas de energía", y se considera inadecuado decir que el ATP y otros compuestos relacionados "almacenan energía gracias a sus enlaces altamente energéticos". ¿Qué opinas de estas expresiones? Justifica tus respuestas.

B. Consideremos la formación de un dipéptido como la alanilglicina a partir de sus aminoácidos constituyentes:

Alanina + Glicina → Alanilglicina

Esta reacción verifica una ΔG = +29 kJ en condiciones fisiológicas y, sin embargo, tiene lugar en las células. Desde el punto de vista termodinámico, ¿podrías explicar por qué?

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Numerosos e importantes procesos bioquímicos y biofísicos son no espontáneos, y sin embargo sucedan en las células de los organismos vivos. En la realización de estos procesos se necesita el acoplamiento del proceso termodinámicamente desfavorable con algún proceso favorable, tal que la ΔG global del sistema decrezca a lo largo del proceso hasta que el sistema alcance el equilibrio (caracterizado por el valor mínimo de G).

El acoplamiento procesos termodinámicamente no espontáneos es uno de los mecanismos más importantes en Bioquímica; es el mecanismo mediante el cual se impulsan reacciones no favorables que forman parte de rutas metabólicas, y procesos físicos como el transporte de sustancias a través de membranas en contra de un gradiente de concentración, la transmisión de los impulsos nerviosos, la contracción muscular…

Las células disponen de compuestos que pueden experimentar reacciones con variaciones de *G* suficientemente negativas como para compensar las ΔG positivas de otras reacciones. Los procesos termodinámicamente favorables que se acoplan con reacciones no espontáneas son, por ejemplo, liberaciones hidrolíticas de grupos fosfato lábiles contenidos en compuestos como el ATP (cuya hidrólisis tiene ΔG = -31 kJ/mol en condiciones fisiológicas), la adenosina monofosfato (AMP), el fosfoenilpiruvato (PEP), la creatina fosfato (CP) o el pirofosfato (PPi).

Las células vivas necesitan una cierta cantidad de ATP para poder completar las rutas metabólicas. El ATP se genera en las células a partir de ADP y ácido fosfórico, en la reacción inversa de la hidrólisis:

$$ADP + H_3PO_4 \rightarrow ATP + H_2O \qquad \Delta G = + 31 \text{ kJ}$$

La síntesis del ATP, no espontánea, se realiza en las células gracias al acoplamiento con la ruptura de la molécula de glucosa, que tiene lugar en varias etapas y con la mediación de enzimas. Un ejemplo sencillo de acoplamiento de reacciones fisiológicas es el de la síntesis de proteínas, cuyo primer paso es la formación de un dipéptido:

$$\text{Alanina} + \text{Glicina} \rightarrow \text{Alanilglicina} \qquad \Delta G = +29 \text{ kJ}$$

Esta reacción se acopla con la reacción de hidrólisis del ATP:

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + H_3PO_4 \qquad \Delta G = -31 \text{ kJ}$$

La reacción global se representa mediante la siguiente ecuación química:

$$ATP + H_2O + \text{Alanina} + \text{Glicina} \rightarrow ADP + H_3PO_4 + \text{Alanilglicina}$$

Puesto que la energía de Gibbs es función de estado, la variación total de energía de Gibbs para este proceso es ΔG = +29 kJ – (-31 kJ) = -2 kJ. Así pues, la reacción acoplada es espontánea: en condiciones fisiológicas, la síntesis del dipéptido alanilglicina a partir de sus dos aminoácidos constituyentes sucede en las células vivas.

En la parte experimental de esta investigación, se llevaron al aula las dos secuencias de actividades descritas (*Termoquímica* y *Termodinámica Química*). Por motivos de la temporalización y de la falta de conocimientos de Biología de los estudiantes, la última actividad de la unidad didáctica *Termodinámica Química* no se pudo implementar, así que la secuencia de actividades *Termodinámica Química* se llevó adelante sin *Fi16*.

Aquí termina el ***Volumen A***, monográfico, de la Memoria de Tesis. En los ***Volúmenes B₁ y B₂*** se recogen la ***Segunda parte*** y la ***tercera parte*** de la investigación.

Universidad de Santiago de Compostela
Facultad de Ciencias de la Educación
Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales

ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA QUÍMICA EN EL BACHILLERATO. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA UNIDAD DIDÁCTICA

Tesis Doctoral, ***Volumen B*** $_1$

Iria Pereira García

Santiago de Compostela, año 2015

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DAS CIENCIAS EXPERIMENTALES

ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA QUÍMICA EN EL BACHILLERATO. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA UNIDAD DIDÁCTICA

Firma de la autora: Iria Pereira García

Memoria de Tesis Doctoral

presentada en la ***Universidad de Santiago de Compostela*** para optar al Grado de Doctor en Ciencias de la Educación

Iria Pereira García

Santiago de Compostela, noviembre de 2015

O DR. JOSÉ MANUEL DOMÍNGUEZ CASTIÑEIRAS, PROFESOR E INVESTIGADOR *AD HONOREM* DA UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

FAI CONSTAR:

Que o traballo de investigación que se recolle na memoria titulada

Ensino da Termodinámica Química no Bacharelato. Deseño, implementación e avaliación dunha unidade didáctica,

foi realizado baixo a súa dirección pola licenciada en Ciencias Químicas, Dna. Iria Pereira García, no Departamento de Didáctica das Ciencias Experimentais da USC, e que, de acordo co artigo 33 do Regulamento de estudos de Doutoramento, valora positivamente e autoriza a súa presentación como Tese de Doutoramento para a obtención do grao de Doutor por parte da interesada.

Santiago, 5 de novembro de 2015

Firmado: D. José Manuel Domínguez Castiñeiras (director da Tese)

A DRA. BLANCA PUIG MAURIZ, PROFESORA DA UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA,

FAI CONSTAR:

Que o traballo de investigación que se recolle na memoria titulada

Ensino da Termodinámica Química no Bacharelato. Deseño, implementación e avaliación dunha unidade didáctica,

foi realizado baixo a súa titoría pola licenciada en Ciencias Químicas, Dna. Iria Pereira García, no Departamento de Didáctica das Ciencias Experimentais da USC, e que, de acordo co artigo 33 do Regulamento de estudos de Doutoramento, valora positivamente e autoriza a súa presentación como Tese de Doutoramento para a obtención do grao de Doutor por parte da interesada.

Santiago, 10 de novembro de 2015

Firmado: Dna. Blanca Puig Mauriz (titora da Tese)

Índice capitular

SEGUNDA PARTE: Resultados de la investigación..... 593

III. Valoración del conocimiento construido durante la fase previa..... 594
III.1. Planteamiento y fundamentación de la ***sHT*$_{1.1}$** 596
III.2. Aplicación y desarrollo de la propuesta didáctica sobre Termoquímica (fase previa ***Fp***) 598
III.2.1. Perspectiva general sobre el desarrollo de la fase previa..... 598
III.2.2. Aplicación y desarrollo de las actividades de la secuencia Termoquímica en el aula..... 601
III.3. Análisis y discusión de los resultados 714
III.3.1. Análisis mediante esquemas de conocimiento..... 714
III.3.2. Análisis mediante competencias 823
III.4. Contraste de la ***sHT*$_{1.1}$**.....834

IV. Valoración del conocimiento inicial de los estudiantes (caracterización inicial) 838
IV.1. Planteamiento y fundamentación de la ***sHT*$_{1.2}$** 840
IV.2. Aplicación y desarrollo de la batería inicial de pruebas (caracterización inicial *Ci*) 842
IV.3. Análisis y discusión de los resultados 846
IV.3.1. Análisis item a item 847
IV.3.2. Análisis mediante esquemas de conocimiento..... 878
IV.3.3. Análisis mediante competencias 951
IV.4. Contraste de la ***sHT*$_{1.2}$**.....957

Índices de tablas y figuras

Índice de tablas

Tabla 1: expresión de los resultados de la determinación del calor asociado al proceso de disolución de NaOH, por transcripción directa de las manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp08..... 647

Tabla 2: expresión de los resultados de la determinación del calor asociado al proceso de neutralización de NaOH sólido con una disolución de HCl, por transcripción directa de las manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp08 655

Tabla 3: expresión de los resultados de la variación de entalpía correspondiente al proceso de neutralización de una disolución de NaOH y una disolución de HCl, por transcripción de las manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp12 667

Tabla 4: expresión de los resultados de la variación de entalpía correspondiente a los procesos de combustión de etano, etileno, acetileno y benceno, por transcripción directa de las respuestas al apartado A (C, en el caso de Ana) de la actividad Fp14..... 683

Tabla 5: criterios y factores de análisis sobre la elección de un hidrocarburo como mejor combustible, extraídos de las manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp14..... 689

Tabla 6: calificaciones obtenidas por los alumnos de la muestra en la realización del primer examen tradicional de la segunda evaluación de Química..... 711

Tabla 7: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Sistemas termodinámicos (ER1), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica *716*

Tabla 8: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Sistemas termodinámicos (ER1) en cada una de las 15 actividades de la fase previa..... *720*

Tabla 9: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER1, Sistemas termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos *723*

Tabla 10: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Procesos termodinámicos (ER2), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica *732*

Tabla 11: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Procesos termodinámicos (ER2) en cada una de las 15 actividades de la fase previa..... *735*

Tabla 12: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER2, Procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos *737*

Tabla 13: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica..... *747*

Tabla 14: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3) en cada una de las 15 actividades de la fase previa *750*

Tabla 15: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER3, Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, idiosincrásicos de los alumnos *753*

Tabla 16: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Dinámica de los procesos químicos (ER4), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica..... *763*

Tabla 17: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Dinámica de los procesos químicos (ER4) en cada una de las 15 actividades de la fase previa..... *765*

Tabla 18: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER4, Dinámica de los procesos químicos, idiosincrásicos de los alumnos *767*

Tabla 19: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica *772*

Tabla 20: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5) en cada una de las 15 actividades de la fase previa..... *774*

Tabla 21: resumen de los principales datos de activación de las relaciones microscópicas de los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3, ER4 y ER5, junto con el macroesquema ERT, en el desarrollo de la unidad didáctica Termoquímica..... *776*

Tabla 22: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER5, Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos, de los alumnos..... *777*

Tabla 23: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1),

extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica *782*

Tabla 24: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1) en cada una de las 15 actividades de la fase previa *785*

Tabla 25: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA1, Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos, de los alumnos *788*

Tabla 26: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica *793*

Tabla 27: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2) en cada una de las 15 actividades de la fase previa *797*

Tabla 28: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA2, Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos *800*

Tabla 29: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica *807*

Tabla 30: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3) en cada una de las 15 actividades de la fase previa *809*

Tabla 31: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento EA3, Representación gráfica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos *810*

Tabla 32: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica *814*

Tabla 33: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4) en cada una de las 15 actividades de la fase previa *817*

Tabla 34: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA4, Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química, idiosincrásicos de los alumnos *819*

Tabla 35: promedio de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención *830*

Tabla 36: promedio de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención *831*

Tabla 37: promedio de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y comeptencia en el tratamiento de la información y comepetencia digital, que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención *832*

Tabla 38: promedio de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención *833*

Tabla 43: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Sistemas termodinámicos (ER1), extraídas de las pruebas de caracterización inicial *879*

Tabla 40: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Sistemas termodinámicos (ER1) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial..... 882

Tabla 41: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER1, sistemas termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos..... 883

Tabla 42: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Procesos termodinámicos (ER2), extraídas de las pruebas de caracterización inicial..... 891

Tabla 43: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Procesos termodinámicos (ER2) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial..... 894

Tabla 44: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER2, Procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos..... 896

Tabla 45: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3), extraídas de las pruebas de caracterización inicial..... 902

Tabla 46: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3) en cada una de las 5 pruebas de Ci..... 904

Tabla 47: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER3, Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, idiosincrásicos de los alumnos..... 906

Tabla 48: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Dinámica de los procesos químicos (ER4), extraídas de las pruebas de caracterización inicial..... 910

Tabla 49: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Dinámica de los procesos químicos (ER4) en cada una de las 15 actividades de la fase previa..... 912

Tabla 50: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER4, Dinámica de los procesos químicos, idiosincrásicos de los alumnos..... 913

Tabla 51: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5), extraídas de las pruebas de caracterización inicial..... 916

Tabla 52: resumen de los principales datos de activación de las relaciones microscópicas de los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3 y ER4 y ER5, junto con el macroesquema ERT, en las pruebas de caracterización inicial de la muestra..... 917

Tabla 53: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1), extraídas de las pruebas de caracterización inicial..... 919

Tabla 54: activación de las relaciones del esquema de acción Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial..... 922

Tabla 55: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA1, Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos..... 923

Tabla 56: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2),

extraídas de las pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra..... 928

Tabla 57: activación de las relaciones del esquema de acción Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra 930

Tabla 58: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA2, Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos..... 931

Tabla 59: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3), extraídas de las pruebas de caracterización inicial 937

Tabla 60: activación de las relaciones del esquema de acción procesos termodinámicos (EA3) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra 938

Tabla 61: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA3, Representación gráfica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos..... 939

Tabla 62: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4), extraídas de las pruebas de caracterización inicial 942

Tabla 63: activación de las relaciones del esquema de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra..... 945

Tabla 64: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA4, Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química, idiosincrásicos de los alumnos 947

Tabla 65: promedio de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra 952

Tabla 66: promedio de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra 954

Tabla 67: promedio de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y comeptencia en el tratamiento de la información y comepetencia digital, que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra 954

Tabla 68: promedio de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra..... 956

Índice de figuras

Figura 1: gráficas extraídas de las manifestaciones escritas de Darío a la actividad Fp05..... 629

Figura 2: gráficas extraídas de las manifestaciones escritas de Ana a la actividad Fp05..... 630

Figura 3: gráficas extraídas de las manifestaciones escritas de Clara a la actividad Fp05..... 630

Figura 4: gráfica extraída de las manifestaciones escritas de Clara a la actividad Fp13..... 676

Figura 5: gráfica extraída de las manifestaciones escritas de Ana a la actividad Fp13..... 677

Figura 6: gráfica extraída de las manifestaciones escritas de Darío a la actividad Fp13 677

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

SEGUNDA PARTE: Resultados de la investigación

III. Valoración del conocimiento construido durante la fase previa

Entre el ***Capítulo III*** y el ***Capítulo VII***, se describen y analizan los resultados de la presente investigación. El ***Capítulo III*** se dedica al contraste de la primera de las subhipótesis, la *Subhipótesis de trabajo 1.1* ($sHT_{1.1}$). Se valoran los conocimientos que se construyeron durante la implementación de la primera propuesta, en la que se concibe como fase de acomodación a la metodología (***Fp***). La evaluación del aprendizaje se basa en el análisis de las manifestaciones orales y escritas del alumnado que se corresponden con las 15 actividades de la secuencia *Termoquímica*. Los resultados de este seguimiento ayudan a determinar las características del conocimiento inicial, porque revelan la evolución del conocimiento durante un proceso de aprendizaje influido por el cambio metodológico (ver ***Volumen A***).

A lo largo del ***Capítulo III*** se describen la toma, el tratamiento, la transformación y el análisis de los datos a partir de los cuales se han obtenido los resultados con los que se contrasta la *Subhipótesis de Trabajo 1.1* ($sHT_{1.1}$):

Planteamiento y fundamentación de la *sHT1*$_{.1}$ (pág. 596). Se plantea y justifica la primera de las dos subhipótesis en las que se ha operativizado la primera hipótesis de trabajo de la investigación.

Aplicación y desarrollo de la propuesta didáctica sobre Termoquímica (fase previa *Fp*) (pág. 598). Se describen las pautas seguidas en la aplicación y desarrollo de la primera unidad didáctica, con el propósito de analizar la influencia del cambio metodológico en el proceso de enseñanza y aprendizaje. Se interpreta cómo fue percibida en general la propuesta, en contraposición con la singularidad e idiosincrasia de cada alumno. Dado el pequeño tamaño de la muestra, se ha podido realizar un seguimiento de todos sus individuos.

Análisis y discusión de los resultados (pág. 714). Se describen y analizan los resultados del seguimiento de la fase previa, mediante dos tipos de análisis cualitativo, a cada uno de los cuales se dedica un apartado independiente:

Análisis mediante esquemas de conocimiento (pág. 714). Se detalla el análisis de los esquemas de razonamiento y acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos que experimentan los sistemas materiales. Con finalidad ilustrativa, se ofrecen ejemplos construidos por la investigadora.

Análisis mediante competencias (pág. 823). Se realiza un análisis de las competencias que desarrollaron los alumnos a medida que resolvieron las situaciones problemáticas planteadas en las actividades. Las competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas en las respuestas a las actividades de la secuencia sobre Termoquímica, y se ilustran con manifestaciones orales y escritas representativas.

Contraste de la *sHT1*$_{.1}$ (pág. 834). Se establecen las conclusiones derivadas del análisis discutido en los apartados anteriores, que permite el contraste de la *Subhipótesis de Trabajo 1.1 ($sHT_{1.1}$)*.

III.1. Planteamiento y fundamentación de la $sHT_{1.1}$

Con el propósito de determinar los conocimientos iniciales del alumnado, se diseñó una batería de pruebas de caracterización inicial de la muestra (ver ***Capítulo IV***). Además, por dos razones, se analizó el proceso de aprendizaje que se realizó durante la implementación de la primera propuesta de enseñanza:

A lo largo de la aplicación de *Termoquímica*, los alumnos construyeron ciertas concepciones y destrezas sobre las que se cimientan las que se trabajarían en la fase de intervención. Además, el desarrollo de la fase previa influye en el aprendizaje posterior, al modelar la adaptación del docente y del alumnado a la metodología objeto de investigación. Por ello, el seguimiento del proceso de aprendizaje influido por el cambio metodológico ofrece información sobre los efectos de la acomodación a la metodología en la evolución del conocimiento.

De estas reflexiones se deriva la primera hipótesis de trabajo, operativizada en dos subhipótesis, dada la amplitud y la diferente condición de los resultados que permiten contrastarla: los del seguimiento de la fase previa hacen posible valorar la construcción del conocimiento inicial, en un proceso de aprendizaje influido por el cambio metodológico; los de las contestaciones a las pruebas iniciales permiten determinar los conocimientos que demostraron los estudiantes inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta de enseñanza. En el ***Capítulo I*** (***Volumen A***) se formuló la *Subhipótesis de trabajo 1.1 ($sHT_{1.1}$)*:

Al comienzo de la aplicación de la primera propuesta didáctica objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes son, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos. La aplicación de la primera propuesta didáctica favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento y de acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar los procesos termodinámicos de manera científica. Tras la aplicación de la primera propuesta en el aula, los estudiantes demuestran haber avanzado en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

La $sHT_{1.1}$ hace referencia a las condiciones iniciales del conocimiento de los estudiantes en relación con el periodo de acomodación a la metodología ensayada. Considerando que la producción oral y escrita revela la incorporación de las relaciones establecidas a lo largo de la intervención y, por tanto, pone de manifiesto la implicación de cada individuo en la evolución de su propio conocimiento, para contrastar la $sHT_{1.1}$ se realizó un seguimiento del aprendizaje mediante el análisis de las manifestaciones orales y escritas que elaboraron los alumnos como respuesta a las quince actividades de la secuencia *Termoquímica*. Este seguimiento ha permitido comprobar cómo fue percibida la primera propuesta de enseñanza ensayada, en contraposición con la singularidad e idiosincrasia de cada alumno. El aprendizaje realizado se evalúa mediante los dos métodos de análisis cualitativo cuyos resultados se describen en los apartados *Análisis mediante esquemas de conocimiento* (pág. 714) y *Análisis mediante competencias* (pág. 823). Los enunciados operativos que se derivan de la $sHT_{1.1}$ y se utilizan para ponerla a prueba, son los siguientes:

- Al comienzo de la unidad didáctica *Termoquímica*, se espera que los alumnos:
  - no describan adecuadamente los sistemas objeto de estudio a través de variables termodinámicas que sean función de estado;
  - no establezcan adecuadamente las transferencias energéticas por calor y trabajo que experimentan los sistemas en los procesos físicos y químicos;
  - no relacionen adecuadamente las transferencias energéticas con los cambios en la energía del sistema, ni a nivel macroscópico ni microscópico;
  - no pongan en juego el primer principio de la Termodinámica en relación con la conservación de la energía;
  - no relacionen la magnitud entalpía con el calor transferido a presión constante ni con la variación de energía del sistema;
  - no utilicen los intercambios de energía para clasificar los procesos, en función de las variaciones de energía interna o de entalpía;
  - no conozcan los métodos calorimétricos;
  - no apliquen las leyes de la Termoquímica y sus implicaciones para estudiar los procesos químicos desde el punto de vista energético;
  - no justifiquen los cambios en la energía del sistema mediante razonamientos basados en los modelos microscópicos de la Química; y
  - no tengan suficientes destrezas relacionadas con las técnicas y métodos matemáticos que se utilizan en Termoquímica.
- La realización de las actividades de *Termoquímica* ayuda a los alumnos a mejorar significativamente sus conocimientos, en términos de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias científicas utilizadas.

Antes de describir e interpretar en profundidad los resultados correspondientes a la fase previa de la investigación, se detallan las pautas que se siguieron en la aplicación y desarrollo de la primera propuesta en el aula.

III.2. Aplicación y desarrollo de la propuesta didáctica sobre Termoquímica (fase previa *Fp*)

Este apartado se divide en dos apartados en los que se exponen las observaciones más destacadas sobre la implementación de las quince actividades que constituyen la propuesta didáctica sobre Termoquímica. Estos dos apartados resumen el desarrollo del período de adaptación del profesor y los estudiantes a la metodología ensayada, porque en ellos se describen y analizan los principales aspectos metodológicos de la intervención, la dinámica de trabajo individual y en grupo (*Perspectiva general sobre el desarrollo de la fase previa*, pág. 598), y las principales incidencias que se produjeron durante las sesiones de clase (*Aplicación y desarrollo de las actividades de la secuencia Termoquímica en el aula*, pág. 601).

III.2.1. Perspectiva general sobre el desarrollo de la fase previa

La fase de acomodación a la metodología ensayada tuvo lugar a mediados del curso académico 2008-2009, entre febrero y mediados de marzo de 2009. Por aquellas fechas, los alumnos habían trabajado ya los conocimientos prescriptivos para la materia de *Química* (MEC, 2007a; XUGA, 2008) sobre la estructura corpuscular de la materia, y los principales modelos de enlace químico. También estaban familiarizados con la estructura y propiedades de las principales familias de compuestos orgánicos, y habían repasado las técnicas básicas de laboratorio y el tratamiento matemático de los datos experimentales obtenidos en experiencias cuya realización requiere ciertos cálculos elementales en Química (métodos de aproximación en la medida, error experimental, utilización de cifras significativas).

Inmediatamente antes del comienzo de la intervención, acababan de realizar uno de los exámenes de evaluación del segundo trimestre, correspondiendo con el final de la unidad didáctica sobre Química Orgánica descriptiva. Días antes de terminar su desarrollo, el profesor, Rodrigo, había informado a los alumnos sobre esta Tesis, y los animó a que entregaran a sus tutores legales un documento de autorización que permitiría realizar la parte experimental de la investigación.

El día anterior al examen tradicional de evaluación, el profesor ya contaba con el consentimiento de todos los padres para comenzar con el desarrollo de la fase previa. Ese mismo día explicó en clase que las dos unidades didácticas siguientes, relacionadas con Termoquímica y Termodinámica Química, se impartirían siguiendo una metodología diferente a la que estaban habituados. Les advirtió que esta investigación, lejos de consistir en un experimento extravagante que pudiera

poner en peligro el desarrollo del aprendizaje, tenía por objetivo ayudarlos a adquirir nuevos conocimientos científicos de acuerdo con una metodología avalada por investigaciones didácticas. Subrayó que las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química se habían diseñado de acuerdo con la legislación vigente, y permitían desarrollar una dinámica de trabajo compatible con la preparación de las pruebas de Selectividad.

También avisó de que las sesiones de clase tendrían lugar en el laboratorio de Química, lo que haría más cómodo el trabajo en grupos y facilitaría la realización de las actividades experimentales y el registro videográfico de la intervención.

El primer día de la fase previa, los alumnos se familiarizaron con los guiones de trabajo que utilizarían durante la implementación de las propuestas. Para que observaran la estructura básica de los materiales de aprendizaje, Rodrigo les proporcionó los guiones de las actividades *Fp01* y *Fp03*. Propuso a los estudiantes que se acomodaran en las mesas del laboratorio distribuidos de tres en tres, tal como se recoge en la *Figura 7* (ver ***Volumen A***), cuya nomenclatura se adopta de aquí en adelante para distinguir los cuatro grupos de trabajo: el primero, $\boldsymbol{G_A}$, estuvo compuesto por Ana, Alfonso y Adela; en el $\boldsymbol{G_B}$ estaban Berta, Brais y Benito; el $\boldsymbol{G_C}$ contaba con Clara e Carlos, y en $\boldsymbol{G_D}$ se organizaron Diana, Darío y Débora. Esta disposición inicial de los grupos no se modificó en las sucesivas sesiones. Sin embargo, a la larga su composición se vio modificada por la reiterada ausencia de algunos miembros (Berta, Diana y Débora).

De acuerdo con los fundamentos de la metodología propuesta, el profesor trabajó activamente para establecer un entorno de trabajo en el que se fomentaran situaciones para que los alumnos identificaran y valoraran sus propias ideas y las de sus compañeros. Supervisaba el trabajo de los grupos, ayudando a los estudiantes a hacer explícitas hipótesis y conclusiones, y a elaborar argumentos para justificarlas.

En las actividades de exploración o de aplicación, la dinámica de trabajo comenzaba con la entrega del guion a los alumnos. Una vez que éstos habían leído los materiales escritos, disponían de un tiempo para realizar las tareas en pequeño grupo. Rodrigo supervisaba la dinámica interna de los grupos, animando a los estudiantes a compartir ideas, formulándoles preguntas encaminadas a guiar los razonamientos, aclarándoles las dudas que surgían sobre el planteamiento o la extensión de las tareas, y ayudándolos a identificar contradicciones, afirmaciones tautológicas e interpretaciones superficiales. Como resultado del trabajo en pequeño grupo, los alumnos anotaban en sus materiales de trabajo las observaciones e interpretaciones que iban elaborando.

Esta dinámica se mantuvo tanto en las actividades teóricas como en las experimentales, fuera cual fuese el tipo de tarea. Algunas actividades están diseñadas para que los alumnos debatieran más intensamente; otras contienen tareas perfectamente compatibles con una dinámica de trabajo más individual (por

ejemplo, aquéllas que incluyen cálculos matemáticos). No se intervino para alterar el desarrollo de los debates en función de que los estudiantes alcanzaran o no un consenso en sus ideas: cuando las observaciones e interpretaciones de los componentes de un grupo divergían demasiado entre sí como para que se aceptaran a nivel grupal, cada alumno anotaba sus ideas personales y desarrollaba sus propias reflexiones, trabajándolas conjuntamente con aquellos compañeros con los que compartían sus ideas, aunque éstos no pertenecieran a su mismo grupo.

Una vez realizadas las tareas en pequeño grupo, se establecía una puesta en común en gran grupo. El profesor invitaba a los alumnos a exponer sus hipótesis, resultados y conclusiones. Se analizaban las distintas aportaciones y se identificaban los resultados, razonamientos y agumentaciones divergentes. Entonces se abría un debate moderado por el docente, y se comparaban las propuestas de los distintos grupos, profundizando en las superficialidades o contradicciones presentes, e introduciendo las ideas de la ciencia escolar en las situaciones que lo hacían oportuno. La intervención del profesor terminaba cuando se llegaba a unas conclusiones consensuadas entre todos. Entonces, volvía a la dinámica de trabajo en pequeño grupo, para que los alumnos anotaran las nuevas respuestas en sus guiones de trabajo y analizaran, juntamente con sus compañeros y con Rodrigo, las diferencias entre sus ideas iniciales y las desarrolladas en el debate en gran grupo.

A lo largo de una serie de actividades relacionadas entre sí según las fases de exploración, indagación y aplicación, las actividades de exploración y de aplicación se diferenciaron en el grado de intervención de Rodrigo, que cambiaba de manera gradual para adaptarse al contexto de instrucción:

El papel del profesor comenzaba siendo discreto, para que los alumnos identificaran y maduraran ideas sin sentir que se los vigilaba; gradualmente se hacía más intervencionista, dependiendo de la necesidad de ayudar a los estudiantes en la evolución de sus ideas y en el desarrollo del trabajo personal y grupal; y volvía paulatinamente a un papel menos intervencionista para terminar ejerciendo de consejero, a medida que los alumnos progresaban en la de confrontación de ideas y la superación de dificultades en el aprendizaje.

Las actividades de indagación se trabajaron según una dinámica diferente, aunque con idéntica distribución en grupos. Los alumnos leían individualmente los guiones de trabajo, en los cuales se exponían, desarrollaban, relacionaban o ampliaban las ideas ya expuestas en clase. A continuación, el profesor explicaba los nuevos modelos, magnitudes y enunciados, aplicándolos a ejemplos concretos familiares para los estudiantes. En una pequeña puesta en común en gran grupo, se discutían los nuevos constructos y se analizaban las informaciones que ayudaban a relacionarlos con ideas científicas ya trabajadas en actividades anteriores.

Los alumnos guardaban los materiales de trabajo en sus propias carpetas, de manera que disponían de ellos siempre que quisieran consultarlos. Algunos días en

que las actividades así lo permitían y el desarrollo de la instrucción era adecuado, se les requirió que terminaran en sus casas algunas tareas de cálculo necesarias para el desarrollo de las actividades, o que consultaran fuera del aula alguna información.

A continuación se describen las pautas seguidas en la aplicación y el desarrollo de cada una de las actividades de la secuencia *Termoquímica*, describiendo y analizando las manifestaciones orales y escritas más representativas de la muestra. Los enunciados de las actividades se representan en el tipo de letra `Courier New`, las manifestaciones orales de los alumnos en *Monotype Corsiva*, y las manifestaciones escritas se transcriben en Comic Sans.

III.2.2. Aplicación y desarrollo de las actividades de la secuencia *Termoquímica* en el aula

Conviene recordar que la secuencia *Termoquímica* está estructurada en dos bloques de actividades:

Con el primer bloque de actividades (de *Fp01* a *Fp04*) se pretende que el alumnado adquiera el concepto de sistema termodinámico, reconozca los procesos físicos y químicos como desencadenantes de cambios en los sistemas materiales, e identifique algunos estados relevantes por los que pasa un sistema en los procesos físicos o químicos (estados inicial y final, y ciertos estados intermedios fáciles de caracterizar, si procede). Se introducen las magnitudes termodinámicas como las propiedades del sistema mediante las cuales se puede caracterizar el estado de éste.

El segundo bloque de actividades (de *Fp05* a *Fp15*) presenta al alumnado los principales enunciados que se utilizan en Termoquímica para analizar los intercambios energéticos implicados en las reacciones químicas. Se introduce la función de estado entalpía como propiedad de los sistemas que permite calcular la cantidad de energía transferida por calor a presión constante, y se recurre a los modelos microscópicos de la Química para justificar los aspectos energéticos de los procesos termodinámicos sobre la base de la estructura corpuscular de la materia. Además, se pretende que los alumnos expliciten y desarrollen destrezas, estrategias y técnicas relacionadas con el diseño, la planificación, la realización, el análisis, la discusión y la comunicación de experiencias de laboratorio. Con este propósito, los estudiantes realizarán dos experiencias calorimétricas mediante las que verificarán o refutarán hipótesis relativas a la descripción, interpretación y predicción de los aspectos energéticos asociados a las transformaciones químicas.

A continuación se describe la aplicación y el desarrollo de cada una de las actividades de la secuencia *Termoquímica*, comentando la dinámica de trabajo y las principales incidencias que se produjeron en la implementación, ilustradas con manifestaciones orales y escritas representativas que dan una idea del aprendizaje realizado por los alumnos y de las dificultades que se encontraron en la evolución

del conocimiento. También se comenta la aplicación y los resultados del examen tradicional de la asignatura en lo que respecta al tema de Termoquímica (*Descripción del examen tradicional realizado tras la implementación de la unidad didáctica Termoquímica*, pág. 710).

III.2.2.1. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp01*: descripción termodinámica de un sistema físico

La *Tabla 13* (***Volumen A***) representa la actividad *Fp01*, transcrita del original que se facilitó a los alumnos. En esta actividad de exploración se plantea una experiencia de laboratorio mediante la cual los alumnos observan los cambios que experimenta un sistema sencillo durante un proceso físico ya conocido para los estudiantes de Bachillerato: la ebullición del agua, en este caso a presión inferior a la atmoférica. El objetivo es que perciban la necesidad de utilizar conceptos científicos para exponer sus observaciones sin ambigüedad y para elaborar descripciones más detalladas, sistemáticas y precisas que las que proporciona la experiencia cotidiana.

Es previsible que ya conozcan la mayoría de los conceptos científicos que se espera incorporen a su discurso al realizar esta actividad: temperatura, presión, volumen, masa, composición química, calor, trabajo, energía... Se pretende que incorporen otros (sistema termodinámico, estado termodinámico y variable termodinámica), que ayudan a revisar y reestructurar las ideas conocidas y relacionarlas entre sí en el marco de un nuevo ámbito del conocimiento científico: la Termodinámica. Se trata de hacer ver a los estudiantes que para caracterizar los cambios que experimenta un sistema es útil estudiar las propiedades que definen su estado. A partir de esta idea se puede introducir el concepto de proceso termodinámico como la sucesión de estados de un sistema material.

El desarrollo de la actividad invita a los alumnos a que detallen por escrito sus observaciones sobre el fenómeno (apartado A) para después elaborar una interpretación del mismo (apartado B).

En principio, sería deseable que ellos mismos realizaran la experiencia. Sin embargo, dada la escasa habilidad manipulativa de estos estudiantes, el profesor consideró más prudente plantear la actividad como una experiencia de cátedra. Para asegurarse de que todos percibían adecuadamente los cambios sucedidos en el agua, el docente dispuso el material de laboratorio de manera que pudieran observar el fenómeno sin peligro de accidentes, y les iba formulando preguntas sobre la experiencia. Al terminar, los estudiantes volvieron a las mesas de trabajo y se abrió un tiempo de debate en pequeño grupo para que plasmaran por escrito sus observaciones y discutieran las interpretaciones que surgían. Rodrigo supervisaba el progreso de los razonamientos y las argumentaciones que se iban desarrollando, e intervenía para regular la buena marcha de las tareas en los distintos grupos, moderando el debate en los momentos en que lo consideró conveniente.

Una vez que los alumnos hubieron recogido por escrito sus observaciones e interpretaciones, se dio paso a una puesta en común en gran grupo, con el profesor como moderador. Se identificaron y desarrollaron las respuestas debatidas en los grupos, casi todas basadas en un conocimiento cotidiano del fenómeno. El profesor se apoyó ellas para introducir las ideas de la ciencia escolar y ayudar a los alumnos a percibir su utilidad. Después del debate en gran grupo, se dejó un tiempo para que los alumnos reflexionaran individualmente y en pequeño grupo sobre las ideas surgidas en el aula, y para que redactaran el apartado C de la actividad, en el que se pide que anoten las diferencias entre las observaciones e interpretaciones que sostenían al inicio y las que consideraron más adecuadas después del debate en gran grupo.

Desde el principio, se hizo evidente que los alumnos no estaban familiarizados ni con el trabajo en pequeño grupo ni con la argumentación en el aula. Los resultados de las entrevistas realizadas a los propios estudiantes y a los profesores del centro confirman esta interpretación.

Además de la falta de hábito al trabajo cooperativo y al desarrollo de la actividad argumentativa, en esta primera sesión se detectaron una serie de dificultades que se volverían a poner de manifiesto en momentos posteriores de la intervención. Los obstáculos más destacables tienen que ver con la inseguridad personal y la escasa autorregulación de algunos alumnos, y con la actitud indolente, irresponsable y poco respetuosa de otros para con sus compañeros y con el profesor (ver ***Capítulo VIII***).

Revisando el registro videográfico de las sesiones de aula, se percibe cómo el planteamiento de esta primera actividad motivó cambios notables en las actitudes del alumnado hacia el desarrollo de su trabajo personal. Nada más comenzar la sesión, nada más leer el guion de la actividad, Alfonso, Brais, Benito, Diana y Débora mostraron incomodidad y desagrado por el hecho de que les planteara un problema "que ya se sabían". Sin embargo, su actitud se volvió favorable al trabajo cooperativo desde el momento en que observaron la experiencia de cátedra y a medida que, sobre la marcha y con ayuda del profesor, se hicieron conscientes de que en sus primeras respuestas se habían limitado a postular hipótesis como solución o conclusión, sin fundamentar los razonamientos en modelos o teorías científicas ni relacionarlos satisfactoriamente con las observaciones sobre el fenómeno. Benito, en particular, participó muy activamente en el desarrollo de la argumentación tanto con el profesor como en el seno de su grupo.

Al comienzo de la intervención, los alumnos se mostraban dispuestos a aprender, aunque poco seguros de sus conocimientos, y les costaba proponer ante los demás sus ideas incluso en pequeño grupo. A excepción de Benito y Darío, se les veía poco participativos cuando se trataba de expresarse en voz alta. Pero, de la perplejidad inicial de verse "solos ante el peligro" (en palabras de Rodrigo), durante

el debate en pequeño grupo pasaron a implicarse activamente en la búsqueda de una solución al problema, en parte animados por el reto de ofrecer una explicación científica a un fenómeno de la vida real, y en parte motivados por la necesidad de dar con una respuesta que se suponía que ya debían conocer. La profusión de la producción escrita correspondiente a las actividades de la fase previa revela que la mayoría realizó un intenso trabajo en la resolución de los problemas planteados.

La dificultad a manifestar las propias ideas ante los compañeros y el profesor no parece deberse a que se encontraran cohibidos ante las cámaras de vídeo y las grabadoras de audio: transcurridos unos veinte minutos de la primera sesión, parecían haberse olvidado de la presencia del material de grabación, y se comunicaban entre sí con naturalidad. Quizá la incomodidad para exteriorizar sus ideas se deba en parte a la timidez, especialmente en el caso de Ana, Alfonso, Carlos, Clara y Darío. Pero también está bastante implicada una idea muy extendida en el alumnado, y que en entrevista personal manifestaron prácticamente todos los alumnos de este grupo: la concepción del aprendizaje como un proceso de asimilación pasiva de los "contenidos de clase" transmitidos por la enseñanza. Una consecuencia inmediata de esta concepción es la anulación de la argumentación en el aula, que se juzga innecesaria porque para la asimilación de las supuestas verdades científicas no tienen utilidad la negociación de significados ni la búsqueda de convenios y consensos en la construcción del conocimiento.

Cuando el alumno se considera a sí mismo un ente pasivo que digiere en la intimidad los contenidos vertidos en clase, las metodologías constructivistas se pueden convertir para él en una experiencia extraña, molesta y en cierto sentido inquietante, porque le exigen que adopte un rol activo que transgrede las normas tradicionales del entorno académico y no le deja refugiarse en un silencio discreto que lo proteja del juicio del profesor y de sus compañeros. Estas ideas aparecen en las entrevistas a los alumnos: varios manifiestan que la intervención de Rodrigo y los materiales utilizados en clase les ayudaron a aprender y a obtener buenos resultados en los exámenes; pero al mismo tiempo consideran que para estudiar se habrían sentido más seguros y cómodos guiándose por un libro o unos apuntes que expusieran los contenidos según el orden y relevancia que el profesor les hubiera otorgado para el examen

A continuación se transcriben algunos ejemplos relevantes de las manifestaciones orales y escritas que realizaron los alumnos en esta actividad.

Durante el desarrollo de la experiencia magistral, describieron verbalmente sus observaciones sobre la ebullición del agua a presión reducida como "un burbujeo". Sin embargo, no lograron identificar a qué se debía este burbujeo:

[Profesor]: ¿Qué está pasando? Cuando el agua burbujea, ¿a qué se debe?

[Berta]: ¿A la diferencia de temperatura entre dentro y fuera?

[Profesor]: Eh, sí -pero ahora hay diferencia de temperatura entre dentro y fuera y no burbujea [Berta se encoge de hombros, y algunos compañeros la imitan.]

En este punto, Rodrigo dirigió las observaciones hacia la diferencia de presión entre la atmósfera y el interior del recipiente. Repitió la experiencia de ebullición a presión reducida, e inmediatamente después de que remitiera el burbujeo del agua, destapó el balón y preguntó a los alumnos a qué se debía el sonido que acababan de escuchar. Éstos lo atribuyeron a las diferencias de presión, pero les costó comparar los valores del exterior y el interior del recipiente: consideraban que dentro del balón existía mayor presión que en el ambiente.

[Profesor]: Pero ¿dónde hay más presión, dentro del balón o fuera?

[Benito y Brais a la vez]: Dentro.

[Profesor]: ¿Y si hay dentro, porqué? -pregunto: lo lógico es que saldría el tapón disparado, no me costaría sacarlo, ¿no?

[Benito]: Porqueee... Porque al ponerle el agua fría, el vapor se volvió... otra vez líquido, e hizo succión. [Sus compañeros se ríen]

Manifestaron su asombro por un fenómeno que consideraban paradójico: al enfriar el agua, ésta se ponía a hervir. En sus manifestaciones escritas, todos identificaron el fenómeno como una ebullición, aunque Benito, Berta y Darío rehusaban emplear explícitamente el verbo hervir o el sustantivo ebullición:

A. ¿Qué le sucede al agua caliente del recipiente:
2.- al colocar el recipiente bajo el chorro de agua fría?

[Benito]: volve a facer burbullas

[Berta]: O colocar baixo a billa de auga fría o matraz observamos que a auga burbullea como se estivese volvendo a ferver pero con moita menos intensidade.

[Darío]: Que volve a "ferver".

Durante el desarrollo de la experiencia, ninguno ofreció explicación al burbujeo observado. En el debate en pequeño grupo, elaboraron cuatro interpretaciones relevantes para el fenómeno propuesto. Ordenadas desde la más adecuada hasta la más alejada con respecto a las ideas de la ciencia escolar, son:

B. ¿A qué crees que se deben los fenómenos que observas?

[Benito]: Que ó diminuir a presión do recipiente o punto de ebullición diminue, e como a auga ainda está quente, ferve

[Berta (razonamientos similares: Brais, Carlos, Darío)]: Eu considero que os fenómenos que observamos son debidos ás diferenzas de presión que hai dentro do

matraz tapado tras ferver a auga e o medio interno que provocan que a agua ferva a menor temperatura.

[Alfonso (razonamientos similares: Ana)]: A auga quente ó metelo baixo a auga fría, prodúcese un cambio brusco de temperatura e este cambio fai reaccionar a auga e a fai ferver. Tamén o aire de dentro do recipiente ó quentar o recipiente diminúe a presión e ó enfrialo aumenta a presión e a auga ferve

[Diana (razonamientos similares: Débora)]: Cos cambios de temperatura, rómpense desnaturalízanse as moléculas de H2O. As burbullas son debidas á liberación de O2 e faise o vacío.

Durante el debate en gran grupo, surgió la diferencia entre la ebullición y la evaporación. Cuando Rodrigo preguntó sobre la posibilidad de que el agua del balón se estuviera evaporando cuando se encontraba a temperatura ambiente, solamente respondieron Benito y Berta, negando esta posibilidad. Entonces el profesor preguntó qué sucedería al cabo de muchas horas si se dejara en el aula el balón destapado y lleno de agua; entonces Ana, Adela y Benito respondieron sin dudar que el agua se evaporaría. Después de la primera sesión, en la reunión entre el profesor y la investigadora, Rodrigo comentaría que los alumnos de este grupo, y especialmente Adela, eran muy proclives a ofrecer respuestas irreflexivas que ellos mismos refutaban en cuanto se les formulaba otra pregunta que les hiciera ver que la respuesta se contradecía con las observaciones realizadas o con los demás razonamientos.

A la hora de hacer converger las explicaciones de los alumnos hacia las de la ciencia escolar, Rodrigo les propuso analizar el funcionamiento de la olla a presión. Se transcriben las respuestas dadas por Carlos, Brais y Benito a la pregunta sobre el motivo de que una olla a presión tenga ventajas sobre una convencional:

[Carlos]: Que acabas antes.

[Brais]: Que a auga ferva antes.

[Benito, replicando a Brais]: No, que o punto de ebullición baixa.

Ninguno ofreció una respuesta aceptable a esta cuestión. Tampoco supieron responder qué temperatura máxima puede alcanzar una olla convencional abierta, hasta que el profesor hizo alusión al fenómeno de ebullición del agua en condiciones de presión atmosférica.

Examinando las respuestas que elaboraron durante el debate en pequeño grupo y la puesta en común, se observa que uno de los mayores obstáculos en la interpretación del fenómeno observado fue la dificultad para relacionar las variables temperatura y presión. Por ejemplo, las interpretaciones que redactaron Ana y Alfonso antes de la intervención del profesor, recogen una relación inversa entre

presión y temperatura, lo cual contradice las observaciones sobre la extracción del tapón. La dificultad para relacionar temperatura y presión impide profundizar en la variación del equilibrio líquido-vapor del sistema y, al no poder justificar el fenómeno basándose en la variación del equilibrio de fases, estos alumnos consideraron que la ebullición a temperaturas diferentes de 100 ºC responde a una alteración de las propiedades naturales del agua, a causa de los cambios bruscos en la temperatura y/o la presión del sistema.

Además de estas dificultades para relacionar las variables termodinámicas, también hubo problemas para identificar el proceso de ebullición como un cambio de estado, diferenciado de la evaporación. Algunos no lo consideraban un proceso propiamente físico; por ejemplo: en las manifestaciones escritas de Diana y Débora se describe la ebullición como un proceso químico.

A pesar de estas dificultades iniciales, después de la intervención del profesor, la mayoría de los alumnos alcanzaron progresos en sus interpretaciones, tanto a nivel descriptivo como interpretativo, como se desprende de las respuestas escritas de los cuatro estudiantes ya citados. Sus respuestas al apartado C incluyen nuevas aportaciones suponen una evolución de sus ideas iniciales hacia las de la ciencia escolar:

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Benito]: A auga ferve a 100 °C se está a 1 atm, pero co tapón posto ó metela debaixo da auga fría o vapor de auga* condénsase e diminue a presión, e polo tanto diminúe a temperatura á que ferve a auga, e como aínda está quente, ferve

* que se formou ó quentala

[Berta]: Sí, agora sei que a o sistema (balón e auga) ferven por un proceso de transferencia de enerxía chamado CALOR, e que a variable Presión é moi importante porque o introducir a o balón quente e tapado baixo a auga fría producimos que a Presión dentro do balón diminua tan rápido que a auga do balón ferva durante uns instantes a menos temperatura de 100 °C provocado por haber unha presión de menos dun 1º.

[Alfonso]: Non, a auga dentro do recipiente é un sistema. O mecheiro libera enerxía en forma de calor e esa enerxía se transfire á auga, o que fai que aumente a temperatura da auga e a fai ferver. Ó tapalo recipiente o sistema é pechado, co que só intercambia enerxía co entorno. Tamén varía a presión do interior do recipiente.

Ó botarlle auga fría a auga continua fervendo xa que ferve a menos temperatura pola presión, xa que se a presión baixa, a Tª de ebullición baixa.

Variación de presión polo peche do sistema

[Diana]: Sí, variaron. Ademais da temperatura, depende da presión. E además a densidade, tamén varía.

Sistema pechado.

Variación de T ao aportar E en forma de calor ó sistema.

" de P ó "pechar" o sistema

Terminada la sesión, el profesor aseguró que tenía impresiones encontradas:

Consideraba un gran avance que ya el primer día los estudiantes "hablaran en clase", colaboraran entre sí y se implicaran en la realización de la actividad, pero le parecía insuficiente el nivel argumentativo alcanzado, y para las sesiones siguientes se propuso subrayar la necesidad de que explicitaran sus ideas y las debatieran. Valoraba positivamente que el alumnado razonara y describiera con detalle las ideas de la ciencia escolar "aunque [éstas] no figuraran en el guion [de trabajo]". Sin embargo, al mismo tiempo le inquietaba el hecho de que las dificultades para comprender y describir un fenómeno conocido hubieran obstaculizado la introducción de las ideas científicas. Dado que este tipo de actividades "cualitativas" (problemáticas) requerían bastante tiempo y esfuerzo a los alumnos, temía que la temporalización de la asignatura impidiese "entrenarlos suficientemente" con ejercicios numéricos, necesarios para superar la Selectividad.

III.2.2.2. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp02*: la energía en los sistemas termodinámicos

Terminada la actividad de exploración *Fp01*, se desarrolló la actividad de indagación/reestructuración *Fp02* (*Tabla 14*, ***Volumen A***), que, como las demás actividades de este tipo, plantea al alumnado un texto en donde se exponen las ideas que se discutirán en el aula. Los textos de las actividades de ingadación se redactaron de manera que sean comprensibles para el alumnado de 2º de Bachillerato, sin perder de vista el objetivo de familiarizar a los estudiantes con el léxico y los estilos de redacción característicos de los textos científicos.

En *Fp02* se desarrollan el concepto de energía interna y el primer principio de la Termodinámica, integrando, reestructurando y ampliando las relaciones conceptuales que se trabajaron en *Fp01*. Se define el concepto de energía interna a partir de la cantidad de energía intercambiada entre el sistema y el entorno. Se introducen los formalismos relacionados con la simbología matemática que se aplica a los balances energéticos sistema-entorno, y se presentan los enunciados científicos como relaciones que establecen los expertos integrando teoría y experimentación para obtener afirmaciones válidas que permitan interpretar hechos, situaciones y fenómenos con la potencia explicativa de los modelos y las teorías científicas.

Desarrollando estas ideas, se pretende hacer reflexionar al alumnado sobre la naturaleza de la Ciencia, desde la corriente del realismo no representativo.

En el aula, *Fp02* se implementó tal y como se había programado según el modelo de diseño y desarrollo de las actividades de la secuencia *Termoquímica*:

Se comenzó con la lectura individual del texto, que los alumnos hicieron en absoluto silencio. Después, el profesor abrió un debate en pequeño grupo, animando a discutir y analizar las principales ideas del texto, y a relacionarlas con las que se acababan de trabajar en la actividad *Fp01*. El desarrollo del debate en los grupos fue bastante activo, aunque se vio interrumpido a los pocos minutos cuando el aula quedó a oscuras por un corte en el suministro eléctrico. Las cámaras de vídeo con las que se grababan las sesiones estaban conectadas por cable al suministro eléctrico, así que el incidente cortó el registro videográfico; de todos modos, el seguimiento de las manifestaciones orales se realizaba también en formato de audio, mediante unas grabadoras sin cable colocadas sobre las mesas de trabajo. Durante varios días más, las sesiones de clase se verían alteradas por breves pero frecuentes apagones, hasta que los servicios municipales repararon las instalaciones eléctricas de la zona, que se habían dañado por la caída de árboles durante un vendaval.

El día que se implementó *Fp02*, el apagón produjo un momento de confusión en el aula. Viendo que el incidente distraía a los alumnos, Rodrigo recondujo el trabajo en pequeño grupo hacia una puesta en común de las ideas del texto, preguntando a los alumnos en qué se parecian los cambios que habían observado en las dos ebulliciones de la actividad *Fp01* (a presion ambiente y a presión reducida):

[Carlos]: ¿Que houbo unha reacción?

[Ana]: La temperatura.

[Diana]: El calor.

Se introdujeron entonces las transferencias por calor y por trabajo y su relación con la energía total intercambiada entre el sistema y el entorno como consecuencia de cualquier proceso. La naturaleza del calor y el trabajo como procesos de transferencia de energía ya se había trabajado en la actividad *Fp01*, y se retomó a partir de la noción histórica del calor como un fluido que se transfería entre cuerpos. Para refutar esta concepción del calor, Rodrigo les propuso el ejemplo de las transferencias de energía que se producen al frotar las manos. En cuanto a la naturaleza del trabajo, los alumnos parecían no recordar la definición macroscópica.

También se hicieron explícitas las dificultades para elaborar una definición de energía acorde con las ideas científicas. En un principio, los alumnos sostenían una identificación vaga e imprecisa entre energía, fuerza y trabajo:

[Profesor]: ¿Alguén me pode dar unha definición de enerxía, o que entendedes por enerxía?

[Benito]: No sé.

[Berta]: unha forza, ou... non sei. Como capacidade... non sei, non sei.

[Alfonso]: ¿Unha forza para mover algo?

Rodrigo comentó la relación entre los procesos de transferencia de energía y la energía que tienen los sistemas materiales por estar constituidos de partículas, y recalcó que la comunidad científica no ha llegado a un acuerdo satisfactorio en la definición de energía. Comentó la definición elaborada por Feynmann y, a partir de ella, introdujo el primer principio de la Termodinámica como una afirmación construida por los científicos para analizar los cambios energéticos de los sistemas.

La idea de conservación de la energía en el universo también produjo cierta inseguridad en los alumnos, hasta que intervino Rodrigo:

[Profesor]: ¿Para o universo, cómo sería, a variación de enerxía interna do universo? (No responden) ¿Pode transferir enerxía interna co entorno, o universo?

[Darío]: No, non hai entorno.

[Profesor]: Non hai entorno, entón ¿cómo sería, a variación de enerxía interna do universo, cómo sería?

[Adela]: ¿Cero?

[Darío]: Cero.

Sin embargo, a la hora de encontrar un enunciado del primer principio de la Termodinámica que sea útil para analizar las transferencias energéticas de los sistemas termodinámicos, se contentaban con afirmar que la energía del universo es constante… suceda lo que suceda con el sistema y su entorno:

[Carlos]: "A enerxía do universo é constante", (…) porque a enerxía está ahí dentro, e que… non sae".

[Profesor]: O que pasa é que, ¿eso é práctico, decir que a enerxía do universo? – Tú estudias un proceso e dis: a enerxía do universo é constante. ¿Eso é práctico?

(Carlos se encoge de hombros.)

[Adela]: ¿No se puede decir que a materia non se crea nin se destruye, sólo se transforma?

Sobre la naturaleza de la Termodinámica como disciplina científica, los alumnos exteriorizaron cierta confusión entre los ámbitos de aplicación de la Termoquímica y la Termodinámica en general:

[Ana]: La Termodinámica es una rama de la Termoquímica.

[Darío]: É ó revés.

[Benito]: ¿A Termodinámica non é unha rama da Física que ten moito que ver coa Termoquímica?

[Profesor]: ¿Qué estudia a Termodinámica?

[Débora]: A enerxía dos sistemas.

[Darío]: A influencia da enerxía do sistema.

[Profesor]: ¿E cómo o fai?

[Mª P]: Empregando características dos sistemas.

Rodrigo les animó a utilizar en las siguientes actividades los conceptos y relaciones que se acababan de trabajar, analizando en cada caso a qué sistema y en qué condiciones se aplicaban para estudiar los fenómenos de interés. Con ello, se cerró el debate y se pasó a realizar la actividad *Fp03*, en la que se propone al alumnado describir e interpretar termodinámicamente un proceso químico.

III.2.2.3. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp03*: descripción termodinámica de un sistema químico

En la *Tabla 15* (***Volumen A***) se representa la actividad *Fp03*, transcrita del original que se facilitó a los alumnos. Se trata de una actividad de aplicación que tiene por objetivo que los alumnos transfieran sus conocimientos a la explicación de una situación, hecho o fenómeno nuevo. Para ello, se les propone observar los cambios que experimenta la mezcla reaccionante formada por ácido clorhídrico y granalla de zinc, en el transcurso de una reacción redox sencilla.

Las observaciones relacionadas con el fenómeno consisten en el desprendimiento de un gas (H_2), la disolución de la granalla de zinc y el aumento de la temperatura del sistema (y del entorno). A partir de estas observaciones, los alumnos deben elaborar una interpretación termodinámica del proceso redox.

Como la primera actividad, *Fp03* incluye una experiencia que implica manipular ácido clorhídrico, un ácido mineral fuerte cuyas disoluciones desprenden gas tóxico y corrosivo. Ya se ha comentado que los alumnos estaban poco entrenados en la manipulación del material de laboratorio (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp01: descripción termodinámica de un sistema físico*, pág. 602), pero se pretendía que pudieran realizar esta experiencia por sí mismos, para que desarrollaran habilidades manipulativas y sintieran la novedad y la implicación emocional de trabajar en el laboratorio de Ciencias. Para asegurarse de que la utilización de ácido clorhídrico diluido no dificultaba las observaciones relacionadas con el fenómeno, el día anterior a la implementación de *Fp03*, el profesor y la investigadora habían ensayado la reacción utilizando granalla de zinc y una disolución de HCl 2 M. Dado que el ensayo con el ácido diluido no hace fácilmente perceptibles ni el aumento de temperatura del tubo de ensayo ni el burbujeo del gas

hidrógeno, Rodrigo optó por una solución de compromiso entre la experiencia autónoma y la de cátedra:

Los alumnos, organizados en sus grupos de trabajo, realizaron todas las operaciones experimentales menos la adición del ácido clorhídrico 2 M, que corrió a cargo del profesor. El burbujeo en el seno de la disolución y la delgada columna de gas que observaron llamó poderosamente la atención de los alumnos, que no se atrevían a acercarse a los tubos de ensayo.

[Diana]: ¡Buah! [Se aparta del tubo, impresionada.]

[Profesor]: Que te puede hacer una permanente –como su propio nombre indica.

[Adela]: Yo lo voy a anotar, eso de la permanente, ahí.

[Profesor]: Ah, tocade o tubo por fóra... por donde está o líquido, que estou vendo que non o estades facendo, estades perdendo un par de detalles.

[Clara]: Está quente.

Para después de la experiencia, se había programado un debate en pequeño grupo en el que los estudiantes elaboraran sus interpretaciones sobre el fenómeno. Sin embargo, sobre la marcha hubo que interrumpir el debate para ayudarles a identificar los productos de la reacción, incluido el gas emitido. En sus manifestaciones iniciales, ninguno hizo alusión al cloruro de zinc, a pesar de que el enunciado de la actividad incluía la ecuación química correspondiente a la reacción, aunque algunos sí llegaron a reconocer la mezcla resultante como una disolución. En cuanto a los obstáculos a la identificación del gas, los razonamientos prototípicos están contenidos en las siguientes manifestaciones iniciales:

A. Observa y describe los cambios que observas.

[Alfonso (razonamientos similares: Diana)]: Ó botarlle o ácido o cinc empeza a a botar vapor gas cara arriba burbullas e o tubo se quenta ó botarlle o ácido (...)

[Brais]: (...) e esta reacción deprende hidróxeno gas e burbullea e desprende calor.

[Berta (razonamientos similares: Benito, Débora)]: Os dous productos disolvense e forman unha disolución homoxenea e a sua vez solta ao exterior unha especie de gas como se fose vapor de auga, mentres os dous compostos forman unha reacción, feito que observamos porque burbullean de forma semellante que cando fervemos auga.

Para identificar el gas, se recurrió al método que se presentaría más adelante en la prueba *Ci03* de la caracterización inicial (***Capítulo IV***): se acercó una cerilla a la boca del tubo de ensayo, para que se escuchara el sonido de la armónica química. Nuevamente, la espectacularidad del fenómeno asustó a los estudiantes:

[Adela]: ¡Qué puta! (Salta hacia atrás. Se oyen risas.) ¡Joder!

Los alumnos no tuvieron dificultad para reconocer que el gas liberado es hidrógeno, y clasificaron la reacción de H_2 y O_2 como una combustión. Sin embargo, a la hora de interpretarla no utilizaron un modelo coherente, como muestran las siguientes manifestaciones orales, correspondientes a la puesta en común de ideas:

[Carlos]: Eu teño unha pregunta. O hidróxeno no exterior, ¿se mestura co osíxeno? (...Inaudible...) Se produce unha combustión, ¿no?

[Benito]: Pero o que arde é o hidróxeno, non o osíxeno. O que rompe os enlaces é o hidróxeno, non o osíxeno.

[Profesor]: ¿E o osíxeno non rompe enlaces?

[Benito]: Sí. Digo, non hace falta osíxeno, para que…

[Profesor]: ¿Non fai falta osíxeno, para que? –

[Benito]: Sí, sí, sí, nada. Porque si non, non hai chamas.

[Profesor]: ¿E por qué se producen as chamas?

[Darío]: ¿Porque hai unha combustión?

En general, las manifestaciones orales y escritas iniciales de los alumnos contienen ideas bastante inconexas en la explicación de las observaciones y en la descripción de los estados del sistema. Después de la puesta en común, desarrollaron con mayor detalle sus observaciones y razonamientos, recogieron ideas de otros grupos y, sobre todo, organizaron sus observaciones para generar interpretaciones más sistemáticas. La diferencia entre el antes y el después de la puesta en común se observa también en alumnos poco prolíficos en sus escritos:

B. Interpreta dichos cambios.

[Brais]: Ao liberar gas provócase o burbulleo e a rotura dos enlaces provoca o desprendemento de calor en forma de enerxía.

[Diana]: Cambio da temperatura

Cambio de estado sólido do Zn a líquido transparente.

Liberación de H_2

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Brais]: Trátase dun sistema aberto porque intercambia enerxía en forma de calor e traballo e tamén materia en forma de H_2. Tamén é heteroxéneo porque hai dúas fases: gas e líquido.

[Diana]: *O Zn + HCl dará lugar a un sistema homoxéneo (disolución so como sistema)

A Enerxía a atopamos en forma de q.

Observando a fórmula da reacción $Zn_{(s)} + HCl_{(aq)} — \boxed{H_2} + ZnCl$

así vemos que basámonos como sistema a propia disolución e o vapor que libera.

Intercambio enerxía polo proceso de calor (q)

Sistema aberto xa que intercambia materia e enerxía.

Existe traballo, xa que as partículas de gas expándense, e se o tubo estivese pechado con un tapón, este saltaría. pola presión.

Basámonos para estudar o sistema primeiro fixámonos no Estado inicial e no final.

*Se consideramos como sistema toda a reacción o sistema sería eteroxéneo.

Una de las ideas más destacadas en el debate del grupo de clase fue la discusión sobre la necesidad de elegir un sistema de estudio y caracterizarlo adecuadamente. Varios alumnos, en particular Benito y Débora, elegían como sistema la mezcla reaccionante. En palabras de Débora:

[Débora]: Porque é co que estamos traballando.

Para cuestionar esta decisión, Rodrigo apeló a la clasificación de los sistemas en abiertos, cerrados y aislados, e insistió en la conveniencia de definir un sistema cerrado, constituido por todas las sustancias involucradas en la reacción química; pero los alumnos se mantuvieron firmes en su decisión de declarar como sistema la mezcla reaccionante, que les convencía por coincidir más con sus experiencias sensoriales: la mezcla reaccionante libera gas fuera del tubo, así que el sistema es abierto (intercambia materia y energía con el entorno). De los once estudiantes, diez clasificaron así el sistema, mientras la undécima (Adela) no se decantó explícitamente por ninguna de las dos opciones, y se centró en analizar los intercambios energéticos; el hecho de que no hiciera referencia a transferencias de materia no implica que definiera el sistema como cerrado.

Apenas hicieron referencia a los intercambios de energía en las manifestaciones iniciales, a pesar de haber reconocido que el tubo "se calentaba" o "subía su temperatura". Algunos relacionaron los fenómenos térmicos con transferencias energéticas entre el sistema y el entorno, pero, aunque todos reconocen la liberación de un gas durante la reacción, el concepto de trabajo está totalmente ausente de las manifestaciones iniciales. Después de la intervención, la

mayoría estableció una relación directa entre el aumento de temperatura del tubo y una transferencia de energía relacionada con el calor, aunque las ideas de la vida cotidiana ("el calor se libera", "la energía en forma de calor"…) coexistían con las adecuadas de la ciencia escolar, como acabamos de ejemplificar en las manifestaciones escritas finales de Diana En cuanto al trabajo, solamente cuatro alumnos pasaron a mencionarlo como un concepto relevante en las manifestaciones finales. La interpretación del trabajo de expansión del gas es acorde con el de la ciencia escolar, con expresiones como "realizarse trabajo" o "haber trabajo".

Otro de los aspectos sobre los que más se trabajó durante el debate en gran grupo fue la relación entre los cambios producidos en la energía del sistema y la ruptura y formación de enlaces químicos. La prueba experimental que se utilizó para la identificación del hidrógeno gaseoso les sugirió la idea de combustión, e inmediatamente los alumnos sintieron la necesidad de añadir a sus manifestaciones escritas algunas referencias a los aspectos microscópicos de la reacción entre el ácido clorhídrico y el zinc, aunque éstas se limitan a la ruptura de enlaces en los reactivos. Se recogen a continuación los razonamientos utilizados por cuatro alumnos:

B. Interpreta dichos cambios.

[Ana]: Ó mezclar o Zn co ácido rómpense os enlaces de hidróxeno e obtense $ZnCl_2$. (…)

[Alfonso]: Rompese os enlaces metálicos do Zn e o iónico de HCl

[Brais]: (…) e a rotura dos enlaces provoca o desprendemento de calor en forma de enerxía.

[Benito]: (…) cando se rompen os enlaces, os cales ó romperse liberan enerxía.

Al principio de la actividad, ninguno recogió ideas sobre la formación de enlaces químicos, aun cuando Rodrigo se esforzó en interaccionar con cada uno de los grupos para hacerles ver que las reacciones químicas no involucran únicamente la ruptura de interacciones. Sólo después del debate en gran grupo, tomaron conciencia de que el proceso implica también la formación de enlaces químicos. Como muestra de esta evolución de ideas hacia las deseables, se detallan a continuación las recogidas en las manifestaciones escritas finales de los cuatro alumnos anteriormente citados:

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Ana]: 1º) Aportamos enerxía para romper enlaces

2º) Fórmanse enlaces e enerxía $\Delta E = q + w$

[Alfonso]: Ó aportarlle enerxía facemos que se rompan enlaces e se formen, isto fai que se libere enerxía, que foi maior que o aporte de enerxía para romper os enlaces

[Brais]: (No realiza aportaciones sobre aspectos microscópicos)

[Benito]: O H forma enlaces covalentes entre sí, e sae en forma de gas e este gas é inflamable.

Aunque Benito no incluyó en sus materiales de trabajo ninguna referencia escrita sobre los aspectos energéticos microscópicos, sus manifestaciones orales revelan que desarrolló algunas ideas acordes con las de la ciencia escolar:

[Profesor]: Para romper enlaces, ¿fai falta enerxía, ou se vai liberar enerxía?

[Darío]: Vai facer falta enerxía.

[Profesor]: ¿Por qué?

[Benito]: Para romper o primeiro enlace. E se xa libera enerxía vai rompendo outros. Os enlaces, cando se forman, liberan energía para volverse máis estables.

Clara incorpora por escrito esta idea, relacionándola con el balance neto de energía entre sistema y entorno:

[Clara]: Xa que para a ruptura de enlace hai que aportar enerxía, pero na formación de enlaces a enerxía libérase, polo tanto a enerxía final vai ser maior e esta liberarase polo proceso de calor, entón diremos que ó final q <0

Las impresiones del profesor tras esta tercera actividad fueron bastante optimistas en cuanto a los resultados obtenidos, principalmente por dos razones:

En primer lugar, porque aunque los debates en pequeño grupo fueran menos productivos en cuanto a la cantidad de ideas, debido a la dificultad que supuso interpretar la reacción química, el debate en gran grupo resultó activo y fructífero. Rodrigo se sintió cómodo moderando el debate y guiando las ideas de los alumnos, ejemplificando y contraejemplificando las aportaciones, y anotando en la pizarra las ideas que iban surgiendo. Consideró que era muy positivo haber logrado un clima de aula en el que se generase sin artificialidad una participación estable en el tiempo por parte de todos los grupos.

Además, le sorprendió agradablemente el hecho de que fueran los propios estudiantes los que introdujeran ideas microscópicas en la interpretación del fenómeno; según su experiencia, incluso en Bachillerato suelen encontrarse inseguros empleando los modelos de partículas, enlace y reacción química.

Con todo, se mostró preocupado por dos obstáculos que surgieron durante el desarrollo de la actividad: las dificultades en la identificación de las sustancias intervinientes en la reacción, y la baja capacidad de los alumnos para prestar

atención a los aspectos menos observables y para buscar una estrategia que les ayude a identificar las causas de los fenómenos observados.

III.2.2.4. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp04*: el móvil perpetuo de primera especie

En la *Tabla 16* (***Volumen A***) se representa la actividad *Fp04*, que tiene por objetivo que los alumnos utilicen las ideas trabajadas durante las tres actividades anteriores para construir un razonamiento con el que sean capaces de explicar el proceso termodinámico en el que se basa un hipotético motor explosión de dos tiempos. El planteamiento de *Fp04*, a diferencia de las actividades anteriores, no propone una experiencia de laboratorio a partir de la cual los alumnos van a analizar sus observaciones. En el enunciado se proporciona información sobre el ciclo termodinámico que representa el funcionamiento del motor y, a partir de esta información y del conocimiento sobre las reacciones del proceso cíclico, los alumnos deben identificar el motor propuesto como una máquina a la que se transfiere materia desde el entorno (alimentación del motor) y que devuelve al exterior materia (emisión de gases) y energía por el proceso de trabajo, además del inevitable proceso de calor.

El segundo apartado de la actividad plantea una situación problemática en la que se pide a los estudiantes que aconsejen a un amigo sobre la compra de una segadora imposible que sigue el mecanismo del histórico móvil perpetuo de primera especie. Se trata de una cuestión abierta mediante la que se pretende que lleguen a la conclusión más destacada del primer principio de la Termodinámica: es imposible obtener energía *ex nihilo*.

El diseño de *Fp04* está pensado para facilitar también la introducción de un debate sobre la eficiencia de determinadas máquinas térmicas de uso común, desde los motores de los automóviles a las turbinas de vapor de las centrales térmicas. Las bases teóricas del Primer Principio son un buen punto de partida para discutir las repercusiones energéticas, sociales y medioambientales de las alternativas energéticas a la quema de combustibles, como el carbón, el petróleo o el biodiésel.

Inmediatamente antes de implementar esta actividad, la investigadora y el profesor reflexionaron conjuntamente sobre la necesidad de averiguar enseguida qué conocimientos tendrían los alumnos sobre las reacciones químicas que se plantean en la actividad *Fp04*. Después de las dificultades que habían surgido al analizar la ebullición del agua en condiciones distintas de las ambientales, Rodrigo decidió intervenir más estrechamente con cada equipo de alumnos durante el debate en pequeño grupo, para resolver caso por caso los obstáculos que fueran surgiendo mientras dejaba tiempo a los grupos restantes para deliberar.

Otra vez, los principales obstáculos se presentaron a la hora de identificar e interpretar las transferencias de energía por trabajo. A modo de ejemplo, se

transcriben las manifestaciones orales correspondientes a dos dudas que el grupo de Diana, Darío y Débora consultaron con el docente. La primera de ellas se relaciona con el trabajo mecánico por parte del sistema durante la contracción de los gases:

[Darío]: Rodrigo, ¿por qué aquí dis que o traballo mecánico é debido á expansión de gas? ¿Aí non é que o traballo mecánico é o que... mediante o cal se forma a auga?

La segunda duda sobre la naturaleza del trabajo involucrado en el proceso es más ilustrativa de que, en general, los alumnos consideraban poco plausible el aporte de energía al sistema por trabajo eléctrico, e intentaban explicar el funcionamiento del motor basándose en aportes de energía por calor:

[Diana]: Pero, Rodrigo, para que faga o traballo mecánico (...inaudible...), habería que aportarlle calor.

[Profesor]: ¿Habería que aportarlle calor? ¿E por que?

[Diana]:Pois algo haberá que hacer.

Plasmadas por escrito las manifestaciones iniciales de los alumnos sobre el funcionamiento del motor de explosión, el profesor abrió un tiempo de debate en gran grupo para poner en común las ideas surgidas en los grupos de trabajo y desarrollarlas en conjunto. Con las siguientes anotaciones realizadas por dos alumnos se exponen el perfil de razonamiento más adecuado y completo (Alfonso, Adela, Benito y Clara) y el menos adecuado (Berta) de los que se generaron durante los debates en pequeño grupo:

A. ¿Cómo explicarías termodinámicamente el funcionamiento de un motor de explosión?

[Alfonso (razonamientos similares: Adela, Benito, Clara)]: Temos un sistema que é a auga, a unhas determinadas T, P, V, etc...

A través do W eléctrico, faise un cambio dunha mezcla homoxénea a unha mezcla heteroxénea, composta por que descompón a auga e absorbe enerxía polo que se forma hidroxeno gas e osíxeno gas, que se expande, e debido a expansión dos gases prodúcese un traballo mecánico que libera enerxía mediante a combustión e prodúcese auga líquida.

[Berta]: Termodinamicamente o funcionamento dun motor de explosión explicase da seguinte maneira: A combustión que se produce no interior do motor esta producida porque a presenza de O_2 facilita que se realice a mesma, esta combustión libera enerxía en forma de calor que se usa para que o motor produzca un traballo mecánico e libere o medio como resultante da combustión H_2O.

Solamente dos alumnos, Darío y Débora, utilizaron conocimientos del dominio microscópico para explicar los intercambios energéticos sistema-entorno:

A. ¿Cómo explicarías termodinámicamente el funcionamiento de un motor de explosión?

[Darío]: Mediante un traballo eléctrico rompense os enlaces do H_2O, pero para que estos se poidan volver a formar a partir do H_2 e O, precisase un traballo mecanico. (...)

[Débora]: (...) Mediante un traballo mecánico o osíxeno gaseoso e o hidróxeno gaseoso reaccionan e dan lugar a unha molécula de auga. Esta molécula de auga mediante un traballo eléctrico volve a transformarse en osíxeno e hidróxeno gaseosos. (...)

Esta dificultad de Débora para determinar el sentido de las transferencias de energía por trabajo era común a varios alumnos, y durante el debate en gran grupo se debatió largamente sobre este tema a raíz del razonamiento de Diana, que consideraba que todas las transferencias de energía por trabajo consistían en aportes de energía desde el entorno al sistema para que funcionara el motor:

[Profesor]: O sea, aquí estámoslle aplicando traballo seguido.

[Diana]: Claro que no. A ver, en el estado... A ver, en el estado 1 tienes... eh, aplicando un trabajo, se transforma en energía.

[Profesor]: O sea, tú non tes un motor, tes unha condena.

[Diana]: ¡No!

[Profesor]: Pois deféndete.

[Diana]: Pero no sé cómo defenderme. (...) No, aplicas una vez... ¡Boh!, no sé.

Para vencer estas dificultades, el docente recurrió a proponerles que acoplaran un pistón imaginario al motor y observaran detenidamente el movimiento del pistón en cada uno de los dos pasos del ciclo. Con esta idea, los alumnos llegaron a visualizar que el motor movía el pistón dos veces por cada ciclo, en un paso al expandirse y en otro paso al contraerse.

Otra discusión que surgió durante la puesta en común fue la clasificación del sistema según el número de fases presentes. Brais afirmaba que, para él, los conceptos de fase y estado de agregación son sinónimos, y tanto Ana y Alfonso como Brais consideraron que la mezcla de gases es heterogénea, porque está constituida por dos sustancias químicas diferentes. Para rebatir esta idea, el docente les propuso clasificar las mezclas de agua y aceite (dos sustancias, dos fases) y de agua y alcohol etílico (dos sustancias, una sola fase).

Debido a las dificultades surgidas en torno a los conceptos de calor y trabajo, el docente optó por no trasladar el debate de la energía al dominio microscópico y centrarse en la magnitud macroscópica "energía total del sistema" para ayudar a los alumnos a explicar el funcionamiento del motor en términos de ganancia o pérdida

de energía en unos u otros estados del sistema. Esta idea fue bien acogida, y algunos estudiantes pasaron a utilizar en sus razonamientos el concepto de cantidad de energía. Sin embargo, en las manifestaciones finales de tres alumnas se observa que la asociación entre la cantidad de energía del sistema y el estado de agregación del mismo lleva a desarrollar como idea alternativa colateral la caracterización de las reacciones químicas propuestas como cambios de estado físico:

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Ana (razonamientos similares: Adela, Débora)]: (...) Ó producirse un cambio de estado, é dicir, ó pasar de líquido a gas, prodúcese un aumento de energía. (...)

Enlazando con la cantidad de energía, surgió la clasificación del sistema en función de sus interacciones con el entorno. Los alumnos consideraban el motor como un sistema cerrado, del que ni entraba ni salía materia, pero sí energía. El profesor les recordó que cualquier máquina real necesita alimentación para funcionar y emite gases, y que solamente se podría considerar cerrado si se analizaba como un sistema ideal. A la pregunta de qué diferencia energética marcaría un detector que midiera la energía del entorno a cada ciclo completo del motor ideal, la respuesta de Benito fue:

[Benito]: Si é un motor ideal, é igual. (...) A enerxía que se utiliza para romper os enlaces é a misma que... produce para volverse formar.

Este punto de inflexión en el debate se aprovechó para pasar al segundo apartado de la actividad, en la que se pide a los alumnos que aconsejen a un amigo sobre la compra de una segadora perpetua de primera especie. Esta cuestión, tal vez por su aplicación práctica, suscitó mayor entusiasmo en el debate, aunque no se tradujo finalmente en mayor producción escrita. Sí se observa la implicación afectiva en aserciones iniciales como las siguientes:

[Benito]: ¡Que é un timo!

[Profesor]: ¿Por qué?

[Darío]: A enerxía nin se crea nin se destrúe.

B. Si un amigo te dice que está pensando en comprarse una segadora cuyo motor consume una cantidad de energía menor que el trabajo que realiza, ¿qué le aconsejarías? Explícalo.

[Brais]: Que non a compre, porque iso é imposible, xa que a cantidade de enerxía que consumirá tería que ser igual ó traballo que xera nun motor ideal. (...)

[Berta]: Eu non lle aconsellaría nada, dirialle que eu tamén quero comprar unha segdora desas, posto que é imposible, porque como mínimo a enerxía que consome o

motor tería que ser igual co traballo que realiza, (…)

[Débora]: Aconsellaríalle que a comprase porque o consumir menos enerxía do que traballa o amigo sae favorecido, en resumo, traballa máis e consome menos.

Solamente los tres alumnos del grupo G_D (Diana, Darío y Débora) sostuvieron ideas alejadas de la ciencia escolar en sus manifestaciones iniciales. La mayoría comparó explícitamente el balance energético de un motor ideal y de un motor real, demostrando que aplicaban adecuadamente el primer principio de la Termodinámica. Brais y Berta se anticiparon a los fundamentos del segundo principio y utilizaron la expresión "pérdida de energía" para referirse a la degradación energética inherente a todo proceso real:

[Berta]: (…) e además nos procesos termodinamicos sempre se perde algunha enerxía durante os procesos.

De las manifestaciones de Benito se desprende que considera imposible el hecho de que un sistema pueda generar energía indefinidamente, salvo que… en sus palabras, salvo que el sistema tenga "energía interna", lo que parece querer decir que tenga "energía acumulada" en un dispositivo como una batería:

B. Si un amigo te dice que está pensando en comprarse una segadora cuyo motor consume una cantidad de energía menor que el trabajo que realiza, ¿qué le aconsejarías? Explícalo.

[Benito]: Non pode ser, porque a non ser que o sistema teña enerxía interna, un motor non pode xerar máis traballo que a enerxía que se lle aplica

Pero al analizar el debate en gran grupo, se comprueba que su expresión "energía interna" está relacionada con el entorno remoto del sistema. A la pregunta de Rodrigo sobre si existe algún sistema capaz de multiplicar la energía que le llega, responden Carlos y Benito:

[Carlos]: ¿Pode ser o exemplo ese de que para que a auga ferva, cambiámoslle a presión... e tal?

[Benito]:¿Un panel solar?

[Rodrigo]: ¿Multiplica a enerxía que lle chega?

[Benito]: No, pero lle vén de fóra. (Hace un gesto con la mano que da una idea de la procedencia remota de la energía que absorbe el panel solar.)

Benito reconoce que los sistemas, por estar constituidos por materia, tienen energía (ésa es la "energía del sistema", distinta a la "energía interna", y distingue dos tipos de entorno: existe el entorno inmediato que circunda el sistema, que es capaz de influir sobre el mismo pero de una manera controlable y conmensurable

para el observador; y, además, existe un entorno remoto al sistema, que ejerce una influencia no controlable o conmensurable, en el sentido de que puede transferir al sistema materia y/o energía que pasan a formar parte de él sin que el observador pueda rastrear su procedencia. Ésa es la que él llama "energía interna".

Tras la nueva puesta en común en gran grupo, los alumnos sólo disponían de unos pocos minutos para completar por escrito sus interpretaciones y comentar los principales cambios que observaban en sus ideas. Rodrigo vaciló en proponerles que completaran el apartado C de la actividad en casa, pero no llegó a hacerlo. En ese momento, apareció por primera vez un obstáculo actitudinal al aprendizaje que desde entonces se repetiría varias veces: Brais, Carlos, Berta y Diana se negaron a seguir trabajando, y despacio y sin hacer alboroto comenzaron a recoger sus materiales, dando por finalizada la actividad y la clase. Brais realizaría en su guion una anotación para dar por zanjada la cuestión:

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Brais]: Non variaron as miñas observacións.

En la reunión entre el profesor y la investigadora, Rodrigo opinó que el desarrollo de esta actividad había sido difícil y de resultados dispares, no tanto por el nivel de razonamiento que se alcanzó como por la fatiga que iban acumulando los alumnos conforme se percataban de que en todas las sesiones de clase se les exigiría que reforzaran y ampliaran continuamente sus conocimientos. La metodología ensayada "funciona" (en palabras del docente), pero "cansa" a los adolescentes poco acostumbrados a discutir y a cuestionarse ideas una y otra vez. Ese día en concreto, los estudiantes habían llegado a clase de Química después de un examen de Historia, para el que se habían "atracado a chapar" el día anterior, y acusaban el cansancio de muchas horas de estudio forzado, mal regulado y a contrarreloj. Rodrigo comunicó a la investigadora su impresión de que, a aquellas alturas del curso (principios de febrero), enseguida tendrían que enfrentarse a un problema añadido al desafío intelectual de realizar las actividades: algunos alumnos abandonarían "de plano" la asignatura de Química por considerarla imposible de aprobar, y aunque no renunciaran, postergarían su estudio para priorizar el de otras asignaturas más fáciles.

A pesar del desánimo que manifestaba, el profesor afirmó que ya temía que la metodología no fuera eficaz en el entrenamiento para las pruebas de Selectividad; había revisado con mayor detenimiento las actividades que incluían el tratamiento matemático de los constructos termodinámicos y le parecían útiles y adecuadas, y comenzaba a sentirse cómodo en su papel de guía y director del aprendizaje. Su principal preocupación en aquel momento no se relacionaba con la marcha de la metodología, sino con las actitudes negativas de determinados alumnos hacia el

desarrollo del curso escolar en general y la asignatura de Química en particular.

Tanto Rodrigo como todos los demás docentes entrevistados por la investigadora coinciden en afirmar que, desde hace varios años, se observa en los estudiantes una tendencia creciente a planificar el estudio de tal manera que, hacia la mitad del segundo trimestre de clases, se centran en aprobar las asignaturas más fáciles en detrimento de las más difíciles. En bastantes casos, incluso dejan de asistir con regularidad a las sesiones de ciertas materias o, si asisten, lo hacen como auténticos convidados de piedra que, en palabras de Rodrigo, "ni sienten ni padecen", ni trabajan en el aula ni fuera de ella, ni se esfuerzan más allá de coleccionar breves apuntes o baterías de ejercicios prototípicos de examen, que les valgan de apoyo para el día que decidan sacar adelante la materia. Los alumnos de este grupo manifestaron en las entrevistas que las asignaturas más difíciles para ellos son Filosofía e Historia, por delante de las tradicionales Matemáticas, Física y Química; pero ésta última, por ser una optativa que pocos consideran útil para su vida cotidiana y su desarrollo profesional, es otra de las materias que se caen de la lista de las prioritarias.

El desarrollo de las siguientes sesiones confirmaría la sospecha del docente:

Débora dejó radicalmente de ir a clase, hasta el punto de que solamente se presentó a dos de las ocho sesiones de *Termodinámica Química*. Berta y Diana abandonaron casi por completo el estudio regular de la asignatura. Carlos acentuó su habitual tendencia a no asistir o llegar tarde por quedarse dormido por las mañanas.

A la vista de los resultados del aprendizaje alcanzado a lo largo de la intervención (***Capítulo VIII***), se concluye que no existen indicios para afirmar que la metodología de enseñanza ensayada atenúe o agrave significativamente los problemas de fracaso escolar que se verifican año tras año en un porcentaje significativo de alumnos de este centro y, en general, del sistema educativo (***Volumen A***); así lo confirman también las entrevistas realizadas a los docentes, alumnos y padres de los alumnos que constituyeron la muestra de investigación.

III.2.2.5. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp05*: calor de reacción, a *V* = cte y a *p* = cte

La actividad *Fp05*, transcrita del original que se facilitó a los alumnos, se recoge en la *Tabla 17* (***Volumen A***).

Mediante esta actividad de exploración se pretende que el alumnado reconozca que el calor involucrado en un proceso depende de las condiciones en las que éste se realice. Por otra parte, también se pretende explorar las ideas de los estudiantes sobre la representación gráfica de las transferencias de energía asociadas a una reacción química, y para ello se les propone la elaboración de un diagrama

sobre los cambios energéticos correspondientes a la combustión del carbono en defecto de oxígeno.

Fp05 ofrece la posibilidad de relacionar la cantidad de energía transferida por calor con dos magnitudes termodinámicas principales:

Si el proceso se realiza a volumen constante, no se producirán transferencias energéticas debidas a la expansión o contracción del sistema. Toda la energía se transferirá necesariamente por calor, y entonces la variación de energía interna del sistema coincidirá con el calor involucrado a volumen constante. Si el mismo proceso termodinámico se verifica a presión constante, la energía total transferida sigue los procesos de calor y trabajo, y la variación de la energía interna del sistema se relaciona con ambos. Entonces el calor a presión constante es menor que el calor a volumen constante, no equivale a la variación de energía interna del sistema, y para analizarlo debe definirse una nueva función de estado del sistema, la entalpía, a cuya variación es equivalente.

Para desarrollar estas ideas, en *Fp05* se plantea la posibilidad de analizar la cuantía de las transferencias energéticas de una combustión sencilla y conocida, comparando el cambio energético en condiciones de presión constante y de volumen constante. Con ello, se pone de manifiesto la importancia de definir nuevas funciones de estado del sistema adecuadas a las condiciones de interés, y se enfatiza en la utilidad que tiene ΔH en el análisis de las reacciones químicas, que por lo general se realizan en recipinente abierto a la atmóstera (a presión constante).

La equivalencia entre el calor, que depende del camino termodinámico, y la variación de una función de estado (la energía interna o la entalpía, dependiendo de las condiciones del proceso) es muy conveniente en Termodinámica, porque permite determinar las transferencias de energía independientemente de los estados intermedios por los que pase el sistema. Esta actividad también es conveniente para que los alumnos repasen el protocolo de estudio de los procesos termodinámicos: se elige el sistema, se identifican los estados que definen el proceso, y se determinan las magnitudes termodinámicas que caracterizan dichos estados. Las transferencias de energía se relacionan con las variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas (temperatura, presión y volumen), y se pueden cuantificar mediante las variaciones de las variables termodinámicas principales energía interna y entalpía.

Llegado este punto, cobran sentido los diagramas entálpicos como instrumento para visualizar la cuantía de las transferencias energéticas por calor. En la realización de los diagramas se ponen en juego destrezas relacionadas con la representación gráfica de los procesos, y para facilitar su desarrollo, en *Fp05* se propone trabajar primero las transferencias de energía desde los puntos de vista cualitativo (apartado A) y cuantitativo (apartado B), para que los estudiantes estén ya familiarizados con el proceso antes de construir las gráficas.

El desarrollo de la actividad *Fp05* en el aula comenzó con un debate en pequeño grupo en el que los alumnos plantearon sus ideas sobre la cantidad de energía que se intercambia en la combustión incompleta del carbono en las condiciones de presión constante y volumen constante. Ese día faltaron a clase Alfonso, Diana y Débora, así que el único alumno del grupo G_D se incorporó al G_C, con Carlos y Clara. Quedaban entonces tres grupos de trabajo, y el profesor decidió que en la sesión se realizaran parte de las actividades *Fp05* y *Fp06*, para completar ambas al día siguiente, cuando Alfonso, Diana y Débora estuvieran presentes.

La primera dificultad que se presentó fue el control de las variables presión y volumen, que los alumnos no acababan de visualizar; incluso discutieron la posibilidad de que en condiciones tan distintas tuviera lugar el mismo proceso.

El profesor intervino entonces para centrar el debate, recomendándoles que analizaran los estados y las variables del sistema y no se "perdieran en fantasías". Para ayudarles a conceptualizar el proceso a volumen constante, les propuso que imaginaran los reactivos introducidos en un recipiente rígido y cerrado.

[Profesor]: Cuando se hace el montaje y se cierra, ¿cómo es la presión?

[Varios alumnos a la vez]: Igual (a la presión exterior).

[Profesor]: Ése es el estado uno. Tenemos la presión, temperatura y volumen. Pasamos al estado dos. ¿Qué le ocurre al volumen? (Hay un silencio mientras los alumnos revisan los guiones de trabajo, indecisos.)

[Benito]: El volumen es igual.

[Profesor]: O volumen é igual, vale. Pois quédannos a presión e temperatura, e tedes tamén a enerxía que se pon en xogo, que é a que temos ahí de -113 kJ. ¿Cómo varía a presión?

[Darío]: Ao quentarse aumenta a presión, ¿no?

[Carlos]: Será maior, supoño.

[Profesor]: ¿Non vai a haber outro factor que vai influir?

[Benito]: Que reacciona.

Controladas la presión y el volumen, se comparó la cantidad de energía que se intercambia con el entorno en cada una de las dos condiciones. El profesor, como en las sesiones anteriores, moderaba los debates acercándose a verificar el funcionamiento interno de los grupos; sin embargo, llegado un momento, decidió alejarse un poco de las mesas de trabajo y simular que preparaba la pizarra y las anotaciones de apoyo a las actividades, porque los tres grupos acababan de comenzar un debate global que él no quería interrumpir con su intervención directa. En este debate, Berta participó muy activamente, explicándole a Brais sus ideas

sobre la variación de energía del sistema debido al calor y el trabajo:

[Berta]: Eu creo que se vai producir menos cantidá de enerxía no recipiente aberto, porque está actuando a presión. Vas necesitar más enerxía para que produzca o mesmo, porque ó estar aberto a enerxía –bah, hai mayor presión, así que necesitas poñerlle máis temperatura para que produzca o mesmo.

[Brais]: Xa, xa te entendín.

Berta demostró reconocer estas transferencias energéticas en procesos de la vida cotidiana, cuando amonestó a Brais, que parecía no apreciar su aportación:

[Berta]: Parece mentira, ¿nunca cociches patacas na casa?

[Brais]: Eu tomo todas as patatas fritas, ¿vale?

Posteriormente, los alumnos intentaron relacionar las transferencias energéticas con los cambios en la composición química del sistema, en un intento por ofrecer un modelo completo de la reacción química:

[Adela]: Yo no sé relacionar esto. (Señala con el lápiz la ecuación química.)

[Berta]: (Escribiendo en su guion de trabajo, no atiende a qué se refiere Adela y afirma con entusiasmo.) Si a tapas, necesitas darlle máis calor.

[Darío]: En teoría debe de... de producir máis enerxía, porque si se libera el oxígeno, el oxígeno se pierde, ¿no?

[Brais]: (Riéndose y remedando a Benito.) Se rompen los enlaces.

[Adela]: ¡Y dale con los enlaces!

[Berta]: Brais, vaite deitar un pouco.

Las manifestaciones escritas iniciales demuestran que varios alumnos identificaron adecuadamente dos ideas clave antes de la intervención del profesor: que la cantidad de energía puesta en juego en la reacción química es la misma independientemente de las condiciones del proceso, y que las cantidades de energía intercambiada por calor y por trabajo dependen de las condiciones:

A. ¿Crees que se transferirá la misma cantidad de energía por el proceso calor si llevamos a cabo esta reacción a 25°C en recipiente abierto? Justifica tu respuesta.

[Berta (razonamientos similares: Carlos, Clara, Darío; al día siguiente, Alfonso, Débora)]: Non, porque o estar o recipiente aberto habera a mesma P no interior que no exterior co cal o sistema necesitara maior tª para producir a mesma cantidade de enerxía

[Ana (razonamientos similares: Adela)]: Non, porque ó estar aberto a enerxía (por calor) é menor.

ΔU → varía según a reacción

Sistema pechado

ΔU = Q + 0

Sistema aberto

ΔU = Q + W

Más dificultad supuso manejar los mismos conceptos cuantitativamente. A pesar de haber trabajado con expresiones matemáticas más complejas que éstas durante varios años, los alumnos tuvieron dificultades para expresar las cantidades de las magnitudes, y tendían a ignorar los signos y las unidades con las que trabajaban. Reconocieron que el valor de –113 kJ se refería a la variación de energía interna, pero se bloquearon cuando descubrieron que necesitaban calcular la cantidad de energía transferida por trabajo para poder hallar el calor. Intentaron determinar el trabajo utilizando la expresión de fuerza ejercida a lo largo de un desplazamiento, pero desconocían la fuerza que ejercía el gas contra el entorno. Intervino entonces Rodrigo para recordarles que para transformar la expresión que pretendían utilizar, podían aplicar la relación entre fuerza, presión y superficie. Ante el producto superficie por desplazamiento, se quedaron perplejos, y solamente Benito respondió: se trata del volumen. También se mostraron sorprendidos por el hecho de que acababan de transformar su expresión inicial "fuerza por desplazamiento" a "presión por variación de volumen", y de calcularla, mediante la ecuación de estado de los gases ideales, como $\Delta n \cdot R \cdot T$. Rodrigo tuvo que intervenir también para ayudarles a expresar adecuadamente las cantidades de magnitud.

Después, los alumnos tuvieron unos minutos para discutir la cuestión en pequeño grupo y escribir sus respuestas. Se transcriben las anotaciones de Adela como ejemplo de las manifestaciones sobre el cálculo de la cantidad de calor:

B. Calcula la cantidad de energía que se transfiere por calor cuando se lleva a cabo la reacción en recipiente abierto.

[Adela]: W = F·Δx = P·S·Δx = PΔV. = ΔnRT.

W = 298 · 8'31 · (2–1) = 2476'4 = 2'47 Kj.

2 C + O2 → 2 CO

1 mol gas. 2 mol. gas

ΔU = Q + W

–113 = Q + (2'48) → lleva signo (–) xq ese trabajo lo realiza el sistema

Q = –111 KJ

↳ No es una función de Estado xq depende del proceso

Todas las respuestas a esta cuestión fueron adecuadas, aunque hay que hacer dos puntualizaciones sobre los signos de los resultados:

Darío expresó el valor del trabajo realizado como 2,48 kJ y el resultado final como 111 kJ, sin tener en cuenta el convenio de signos aceptado para calor y trabajo; sin embargo, sus manifestaciones escritas correspondientes al apartado A revelan que acepta que el sistema realiza trabajo sobre el entorno. El caso de Débora es todo lo contrario: escribió una respuesta adecuada pero sus manifestaciones contienen dos erratas que revelan que copió (al día siguiente) la respuesta de su compañero Darío:

[Débora]: (...) $w = P \cdot \Delta V = \Delta n \cdot f \cdot T$ (...) Q = 111 Kg

La primera sesión de aula dedicada a esta actividad terminó con unos minutos de trabajo en pequeño grupo, para que los alumnos comenzaran a elaborar las representaciones gráficas que se proponen en el apartado C. Pero para que hubiera tiempo para trabajar con la actividad *Fp06* en la misma sesión, el profesor encargó a los estudiantes que terminaran de construir las gráficas en casa.

Reunido con la investigadora después de clase, Rodrigo manifestó su preocupación por la marcha de la siguiente sesión, porque Alfonso, Diana y Débora se verían obligados a elaborar sus gráficas "en frío", sin haber trabajado previamente con el sistema desde los puntos de vista cualitativo y cuantitativo. Además, antes de pasar a la actividad *Fp07* se tendría que al menos resumir las principales ideas de *Fp06*, para que los que habían faltado no tuvieran que enfrentarse solos a la reestructuración de las ideas trabajadas por sus compañeros.

Al comenzar la sesión siguiente, a la que asistieron todos, se comprobó que solamente Darío había hecho las representaciones gráficas en casa. Mientras los demás elaboraban sus diagramas en pequeño grupo, Darío reprodujo los suyos en la pizarra a petición del profesor, que se apoyó en estas representaciones para guiar las ideas de los estudiantes hacia las de la ciencia escolar. Dado que las representaciones iniciales de Darío constituyen un buen ejemplo de las ideas que sostenía la mayoría de sus compañeros antes de la intervención del profesor, se transcriben a continuación:

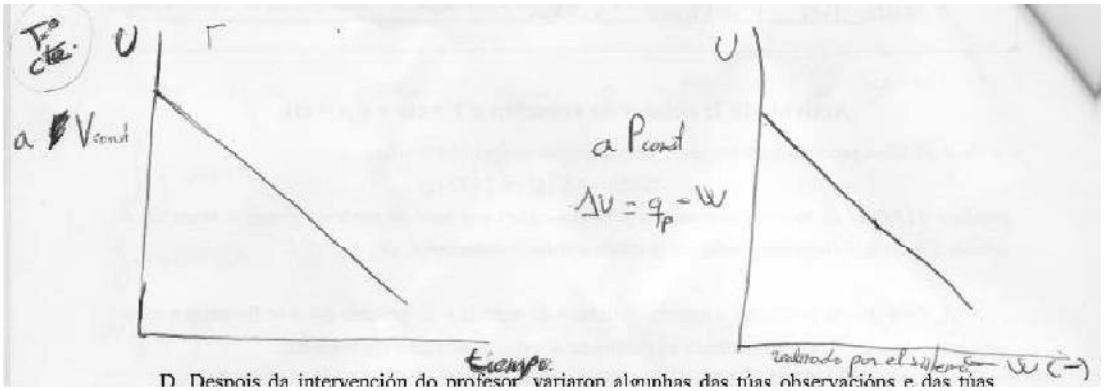


Figura 1: gráficas extraídas de las manifestaciones escritas de Darío a la actividad Fp05

Inicialmente, los compañeros de Darío discutían estas mismas ideas en sus grupos, salvo Berta, que trabajaba separada de sus compañeros por divergencias personales con Brais. Pero las manifestaciones iniciales se vieron influidas por una fuente de información adicional: mientras varios discutían sobre la dependencia entre energía interna y trabajo basándose en la ecuación $\Delta U = q + w$, Ana había consultado el libro de texto y había encontrado en él un diagrama entálpico. Desde ese momento, los alumnos utilizaron el libro de texto como material de consulta para elaborar sus gráficas, adaptando la representación al proceso propuesto. La cuestión de la dependencia entre energía interna y trabajo, coincidente con las ideas de Darío, se ve reflejada en las manifestaciones de todos los que rotularon la variable independiente. Las manifestaciones de Alfonso, Brais, Carlos, Clara y Débora no tienen rótulo, pero sus ideas no diferían sustancialmente de las de sus compañeros, y la decisión de no trazar el eje de la variable independiente obedece a la intención de trasladar a sus gráficas el formato del diagrama del libro de texto.

Para explicar sus representaciones, Darío afirmó que su gráfica sobre el proceso a presión constante respondía a la dependencia inversa de la energía interna frente al trabajo; la gráfica del proceso a volumen constante no podía manifestar un perfil de dependencias comparable, puesto que en estas condiciones no se realiza trabajo y no tendría sentido establecer w como variable a representar. Cuando Rodrigo le preguntó sobre la representación de la energía en los estados intermedios del sistema, Darío aclaró que él había trazado una línea recta uniendo los puntos correspondientes a los estados inicial y final, pero que esta línea era especulativa, porque el valor real de la energía interna del sistema…

[Darío]: (...) depende de la velocidad a la que se libere el trabajo.

Utilizando esta idea de Darío, Rodrigo incidió en la idea de que el objetivo de la gráfica es la representación de la energía del sistema en los estados sobre los que se dispone información. Los alumnos expusieron entonces sus diagramas basados en el ejemplo contenido en el libro de texto, con el rótulo de los valores de energía interna en los estados inicial y final, como se ve en las representaciones de Ana:

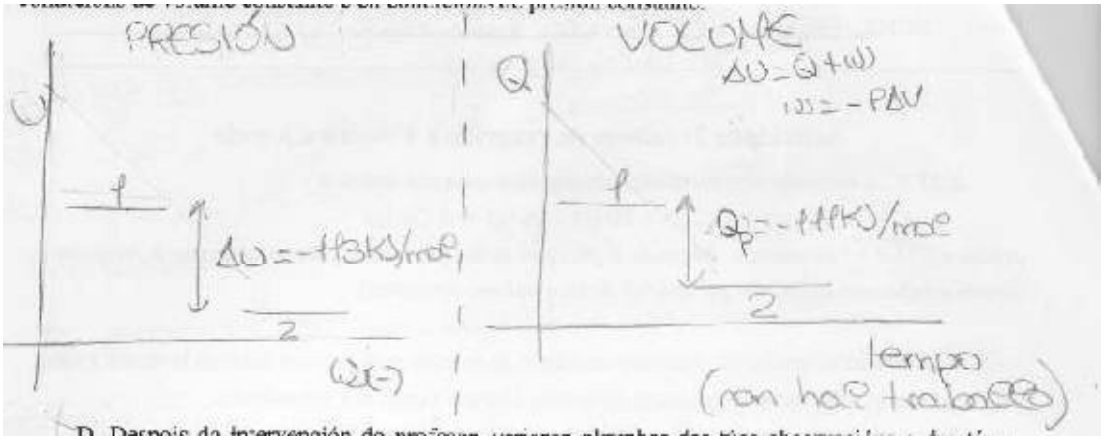


Figura 2: gráficas extraídas de las manifestaciones escritas de Ana a la actividad Fp05

El docente les hizo ver la contradicción de declarar como variable independiente el trabajo, cuando los diagramas representan valores de energía interna en función del estado del sistema. Se debatió además en gran grupo sobre la dependencia física entre la energía interna y el trabajo, y la relación entre las variables dependiente e independiente en las gráficas de dependencia lineal directa e inversa. Surgió entonces la dificultad de analizar las relaciones inversas, que se ha puesto de manifiesto en la literatura y que en este caso se percibe en una gráfica que Berta incluyó en sus manifestaciones iniciales. En ella, para indicar que la dependencia entre energía interna y trabajo a presión constante es inversa, ubicó la representación en el segundo cuadrante del plano cartesiano:

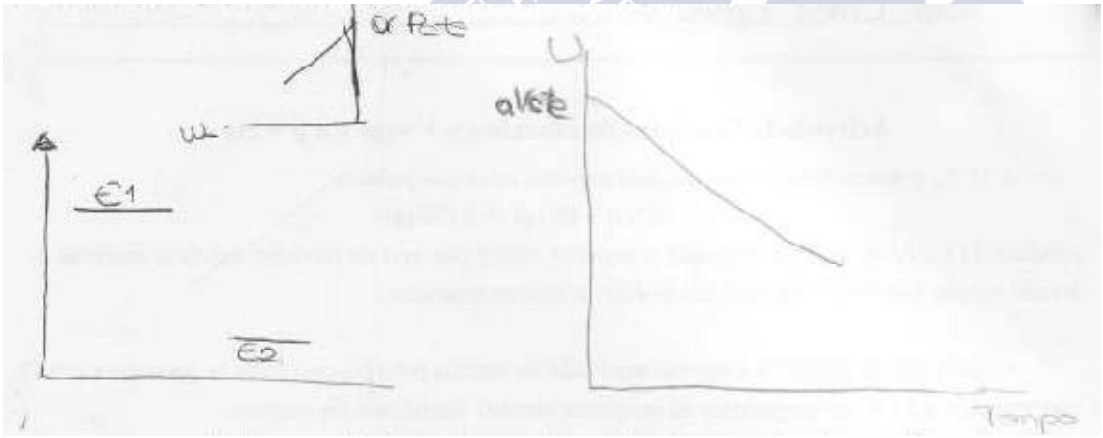


Figura 3: gráficas extraídas de las manifestaciones escritas de Clara a la actividad Fp05

Los alumnos de la muestra tenían inicialmente poca habilidad en el manejo de las relaciones entre variables, incluso para relacionar magnitudes con las que llevaban años trabajando.

Una vez que Rodrigo les hubo ayudado a poner de manifiesto estas ideas sobre la representación gráfica de los cambios energéticos, se introdujo la necesidad de definir la variación de entalpía para estudiar mediante una variable termodinámica las transferencias de energía por calor que tienen lugar en los

procesos a presión constante. La definición operativa de la variación de entalpía se construyó partiendo de la relación entre la energía interna, el calor y el trabajo utilizando la variación del volumen para llegar a la expresión $\Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V$.

En sus manifestaciones finales, todos los alumnos hacen referencia a la definición de la variación de entalpía y su equivalencia con el calor a presión constante o su relación con la energía interna:

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Brais (razonamientos similares: Ana, Alfonso, Benito, Berta)]: $\Delta U = Qp + P\Delta V$

$U_2 - U_1 = Q_p - P(V_2 + V_1)$

$U_2 - U_1 = Q_p - PV_2 - PV_1)$

$U_2 + PV_2 - (U_1 + PV_1) = Q_p$

$H_2 - H_1 = Q_p \Rightarrow Q_p = \Delta H$

$H = U + PV$

[Débora (razonamientos similares: Ana, Adela, Clara, Darío)]: Sí que variou porque agora sabemos que $\Delta U = q + w$

E incrementamos unha nova variable na fórmula, H = U + PV, H (entalpía) é a temperatura a presión constante. A entalpía é unha unha variable estensiva e non depende do proceso. A entalpía é necesario para poder estudiar un proceso.

Finalizando la actividad, Ana y Berta defendieron que el volumen no es una función de estado del sistema, argumentando que "depende del proceso", en una confusión ontológica entre estado y proceso: si un sistema tiene la posibilidad de seguir distintos procesos, la cantidad de volumen final será diferente en cada caso o "estado", esto es, en cada estado final asimilable a un proceso concreto. Para poner en cuestión esta idea alternativa, el profesor les explicó que el significado de la expresión "depender del proceso" equivale a "depender del camino a través del cual se realiza el proceso". Esta aclaración sirvió de nexo para unir el final de la actividad *Fp05* con el comienzo de la actividad *Fp06*, en la que se continuó analizando la naturaleza de la magnitud entalpía y de su variación.

La implementación de la actividad *Fp05* resultó muy fructífera como actividad de exploración, porque con ella Rodrigo logró que los alumnos tomaran conciencia de muchas ideas subyacentes a sus razonamientos. Hasta cierto punto, *Fp05* funcionó también como actividad de indagación, en el sentido de permitió introducir la idea de entalpía vinculándola con la de energía interna del sistema y

con los procesos de calor a volumen constante y a presión constante. Se percibe claramente una evolución de las ideas iniciales hacia las de la ciencia escolar en la mayoría de los alumnos, salvo en el caso de Diana, que no respondió por escrito a ninguno de los apartados de la actividad, y de Carlos, que participó poco en los debates y se preocupaba por copiar las ideas de sus compañeros. Esta asimilación pasiva de las ideas de sus iguales se percibe en sus manifestaciones escritas finales:

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Carlos]: Comprendín o cambio e a gran diferenza que se produce ao efectuar dous procesos iguais en sistemas abertos e pechados, xa que a presión xoga un factor decisivo

Tamén entendín porque usando certos reactivos a cantidade de productos obtida e menor.

III.2.2.6. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp06*: utilidades de la entalpía y de su variación

En la *Tabla 18* (***Volumen A***) se representa la actividad *Fp06*, transcrita del original que se facilitó a los alumnos. Tiene por objetivo repasar y reestructurar las ideas trabajadas hasta la actividad *Fp05*, y relacionar las variaciones de energía interna y de entalpía con las transferencias de energía. Se retoman las nociones de calor a presión constante y calor a volumen constante, que se presentaron en *Fp05*, y se introduce la conveniencia de trabajar con otro tipo de magnitudes que no dependan del camino termodinámico: las funciones de estado. Se definen entonces las variaciones de las magnitudes termodinámicas que equivalen a estos procesos de transferencia de energía. Surge así la variación de entalpía como la variación de una función de estado del sistema que permite cuantificar la energía transferida por calor a presión constante sin atender al camino termodinámico.

El desarrollo de la actividad *Fp06* en el aula se realizó sin modificaciones con respecto a las directrices que marca el modelo de diseño y planificación de las actividades. Los alumnos leyeron el texto y pasaron a trabajar en pequeño grupo. Rodrigo intervino relativamente poco en el funcionamiento interno de los grupos, porque los alumnos vinculaban por sí mimos las ideas del texto con el desarrollo matemático de las ecuaciones que se acababan de formular en la actividad *Fp05*. La ocasión para abrir el tiempo de debate en gran grupo vino dada por la discusión sobre la idea alternativa de que la energía cinética y la energía potencial no son funciones de estado del sistema porque se deben a la influencia del entorno sobre el sistema, a diferencia de la energía interna. En palabras de Darío:

[Darío]: (No es función de estado) Porque la cinética es de la velocidad, y (la

velocidad) no es función de estado.

Aclarada la influencia del entorno y la naturaleza de la energía como función de estado, se desarrolló el vínculo entre la variación de energía del sistema y la del entorno. Los alumnos establecieron sin dificultad la ecuación $E_{sistema} = -E_{entorno}$, aunque dudaron a la hora de relacionarla con la variación de energía del universo:

[Profesor]: ¿Esta ecuación vale pa o sistema, pa o entorno, ou vale pa o universo, ou para todo?

[Darío]: Para o... sistema.

[Profesor]: Para o sistema. ¿Para o universo, cómo sería, a variación de enerxía interna do universo? (Los alumnos no responden.) ¿Pode transferir enerxía interna co entorno, o universo?

[Darío]: No, non hai entorno.

[Profesor]: Non hai entorno, entón ¿cómo sería, a variación de enerxía interna do universo, cómo sería?

[Adela]: ¿Cero?

Se formularon las dos expresiones anteriores como enunciados posibles del primer principio de la Termodinámica, y el Rodrigo propuso a los alumnos que eligieran la que consideraran más útil para estudiar los procesos termodinámicos:

[Carlos]: "A enerxía do universo é constante".

[Profesor]: ¿Por qué?

[Carlos]: Porque a enerxía está ahí dentro, e que... non sae.

[Profesor]: O que pasa é que, ¿eso é práctico, decir que a enerxía do universo? – Tú estudias un proceso e dis: a enerxía do universo é constante. ¿Eso é práctico? (Carlos se encoge de hombros.)

El docente explicó que, cuando se estudia un proceso químico, los científicos no analizan las variables del universo, porque éstas no suelen dar información sobre los cambios que experimenta el sistema. Puso de manifiesto que es prácticamente imposible cuantificar las variaciones de las variables del universo y determinar con precisión la influencia del entorno en el sistema. Entonces, Adela expresó su perplejidad ante tantas dificultades para estudiar los sistemas termodinámicos:

[Adela]: ¿Y no se puede decir que a materia non se crea nin se destruye, sólo se transforma? Ehhh... (Manotea en el aire para dar a entender que su idea no resulta útil en el debate.) Me estoy mezclando.

Les fue difícil conceptualizar que las afirmaciones "la energía del universo es constante" y "la variación de energía del universo es cero" son equivalentes. Esta

tendencia a confundir una magnitud con la variación de la magnitud aparecería en más ocasiones durante la intervención, y no se limitó a las variables termodinámicas principales, con las que los alumnos no estaban familiarizados. Según Rodrigo, en todos los niveles del sistema educativo hay una falta de atención generalizada a estos problemas de aprendizaje. Más adelante, en la entrevista que realizó la investigadora a Nono, el profesor de Física del centro, éste manifestó que muchos alumnos de 2º de Bachillerato, que el curso siguiente podrían comenzar estudios universitarios o de Formación Profesional superior, confunden sistemáticamente la temperatura de un estado del sistema con la variación de temperatura asociada a un proceso, y tienen dificultades para definir la variación de temperatura como la diferencia entre los valores de temperatura final e inicial.

Volviendo al desarrollo de la actividad *Fp06* en el aula, Rodrigo retomó el concepto de entalpía y pidió a los alumnos que clasificaran esta magnitud en función de su dependencia con respecto a la cantidad de materia del sistema. Brais pidió que le ayudaran a recordar si las que dependen de la cantidad de materia son las variables intensivas o las extensivas. Aclarada esta confusión, y viendo que los alumnos dudaban, Rodrigo les animó a que reflexionaran sobre la equivalencia entre la variación de entalpía y el calor involucrado en los procesos a presión constante:

[Profesor]: ¿Se libera la misma cantidad de energía por calor al quemar un mol de carbono que al quemar dos?

No se presentaron dificultades para responder adecuadamente a esta cuestión.

Después de terminar la segunda sesión de *Fp06*, que se dedicó a repasar las ideas trabajadas el primer día para que Alfonso, Diana y Débora se pusieran al día con las actividades, el docente compartió con la investigadora la impresión de que las actividades *Fp07* – *Fp09* ayudarían a los alumnos a utilizar las magnitudes termodinámicas en apoyo de sus observaciones para elaborar interpretaciones científicas. Como estaban sobre aviso de que en las pruebas de Selectividad son habituales las preguntas sobre las técnicas calorimétricas, Rodrigo confiaba en que el "premio académico" ayudaría a motivar a los que empezaban a mostrar signos de fatiga o apatía hacia la asignatura.

III.2.2.7. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp07*: para el trabajo de laboratorio, la planificación es lo primero

Fp07 (*Tabla 19*, ***Volumen A***) es la primera de las tres actividades orientadas a fomentar la construcción de procedimientos y estrategias adecuadas para el diseño y la planificación de experiencias de laboratorio relacionadas con la Termodinámica: las técnicas calorimétricas. En *Fp07* se propone a los alumnos que diseñen y

planifiquen una experiencia de laboratorio para determinar la ΔH asociada al proceso de disolución del hidróxido de sodio en agua en condiciones de presión constante. Esta experiencia calorimétrica se realiza en *Fp08* y, a continuación, en *Fp09* se determina experimentalmente la ΔH asociada a la reacción de neutralización entre la disolución de NaOH de la actividad *Fp08* y una disolución de ácido clorhídrico diluido.

En la actividad *Fp07*, los alumnos deben relacionar el aumento de temperatura producido al disolver el NaOH sólido en agua, con la exotermia de la solvatación de los iones Na^+ y OH^-; teniendo en cuenta que el proceso de disolución se realiza a presión constante, el calor involucrado equivale a la variación de entalpía asociada al proceso. Analizadas estas ideas, se hallarán en condiciones de diseñar y planificar una experiencia de laboratorio para determinar el calor asociado a la disolución del NaOH.

El diseño de una estrategia experimental no consiste solamente en planificar un conjunto de acciones que involucran la utilización de material de laboratorio: los alumnos tienen que ser conscientes de las medidas de seguridad e higiene asociadas a la manipulación del material y las sustancias requeridas, y deben anticiparse a las observaciones que se verificarán durante la experiencia. Con *Fp07*, se pretende que los estudiantes adquieran conciencia de la necesidad de planificar las tareas científicas, y pongan en juego sus conocimientos y habilidades para llevar a cabo una de las técnicas experimentales más destacables en la Historia de la Ciencia y en el ámbito académico, porque las experiencias calorimétricas forman parte de los temas que más se repiten en los exámenes de Selectividad.

Serán los estudiantes quienes diseñen y planifiquen la experiencia calorimétrica que se realizará en el laboratorio mediante la actividad *Fp08*. Corresponde al docente la supervisión de todos los detalles del diseño y la decisión de las cantidades de sustancia y el material de laboratorio que se van a utilizar, de acuerdo con los recursos disponibles en el centro educativo y con las habilidades manipulativas del alumnado.

La actividad sorprendió a los estudiantes, que nunca habían diseñado una experiencia de laboratorio. De acuerdo con las declaraciones de los profesores del centro, la dinámica habitual de las actividades experimentales de Física y Química consiste en que los alumnos realicen una serie de "prácticas" siguiendo un guion en el que se indican paso a paso todas las tareas que tienen que hacer. Incluso cuando los profesores tienen inquietudes e interés por las innovaciones didácticas y por la integración de los saberes en el proceso de aprendizaje, es infrecuente que se animen a abordar en el aula el diseño de experiencias de laboratorio. El profesor colaborador de esta Tesis ha ensayado en varios cursos este tipo de actividades, pero no en todos. Por ejemplo, la investigadora realizó su primer diseño experimental en 2º de Bachillerato con este profesor; no así el hermano de la

investigadora, que estudió desde 1º de ESO hasta 2º de Bachillerato en el mismo centro educativo, entre 1999-2000 y 2005-2006 (no se matriculó en la Química de 2º de Bachillerato, pero sí Física, y no realizó diseños experimentales en ninguno de los seis cursos).

En el desarrollo de la actividad *Fp07*, los alumnos comenzaron su trabajo en pequeño grupo para responder al apartado A, lo que, según Rodrigo, debería presentar pocas dificultades, porque ya conocían el hidróxido de sodio y habían estudiado el proceso de solvatación utilizando un modelo de enlace químico.

Todos identificaron los estados inicial y final del sistema y reconocieron que el proceso implica una pérdida de energía al entorno; salvo Adela, todos vincularon esta pérdida con el signo negativo de la variación de entalpía asociada al proceso. Sin embargo, a la hora de explicar por qué el balance neto de energía es negativo, se presentó nuevamente el obstáculo que había aparecido en *Fp03*: asociaron la variación de energía al único proceso microscópico que describían, la ruptura de interacciones químicas.

[Profesor]: ¿De ónde vén esa enerxía que se desprende?

[Alfonso]: ¿Da ruptura dos enlaces?

El docente intentó en vano animar a los estudiantes a utilizar algún modelo químico que explicara la exotermia de la disolución. Ninguno de ellos recordaba el concepto de solvatación, y fue el propio Rodrigo quien tuvo que introducir el modelo microscópico para explicar la liberación de energía al entorno. En las manifestaciones iniciales, llegaron a atribuir la liberación de energía a la existencia de una interacción entre el agua y el hidróxido de sodio:

A. Si a un volumen de agua, a temperatura ambiente, añadimos lentejas de NaOH y agitamos, podremos observar cómo el termómetro nos indica que la temperatura de la disolución aumenta a medida que el hidróxido de sodio se disuelve. ¿Cómo crees que será la variación de entalpía asociada al proceso de disolución del NaOH en agua? ¿Por qué?

[Ana (razonamientos similares: Alfonso, Adela, Clara)]: Negativa, porque ó producirse a disolución do NaOH en auga libérase enerxía. Trátase dun proceso exotérmico porque a enerxía liberada xorde debido á intervención da auga.

[Brais (razonamientos similares: Benito, Carlos, Darío, Débora)]: Será negativa porque a reacción é exotérmica xa que desprende enerxía ó entorno

Las manifestaciones iniciales de Berta revelan una confusión entre la magnitud entalpía y la variación de la entalpía. Esta alumna considera que la "entalpía negativa" se debe a que la energía se disipa al entorno porque el recipiente donde se realiza la disolución está abierto. De sus manifestaciones no se puede asegurar cuál sería su predicción sobre la variación de entalpía si el recipiente

estuviera cerrado:

A. Si a un volumen de agua, a temperatura ambiente, añadimos lentejas de NaOH y agitamos, podremos observar cómo el termómetro nos indica que la temperatura de la disolución aumenta a medida que el hidróxido de sodio se disuelve. ¿Cómo crees que será la variación de entalpía asociada al proceso de disolución del NaOH en agua? ¿Por qué?

[Berta]: A entalpía sera negativa porque este proceso se leva a cabo nun recipiente aberto, co cal moita enerxía perderase.

La clasificación del proceso según el balance neto de energía creó un cierto desorden, porque los alumnos confundían las palabras endotermia y exotermia, aunque todos reconocían que la variación de entalpía es negativa:

[Brais]: É endotérmico.

Una vez aclarada la terminología, los alumnos debatieron sobre el diseño y la planificación de la experiencia. Identificaron que la variable objeto de medida sería la temperatura, y la relacionaron con el calor mediante la ecuación $q = m \cdot c_e \cdot \Delta T$. Al analizar las demás variables, Benito (G_B), Carlos (G_C) y Darío (G_D) consideraban que sería necesario determinar la masa del sistema antes y después del experimento:

[Darío]: Despois mídese a masa de sodio e máis da auga.

[Rodrigo]: ¿E antes?

[Darío]: (Se lo piensa unos segundos.) Tamén.

Puede que el origen de esta idea esté en las dificultades para controlar las variables: el hecho de que una magnitud sea relevante en el estudio de un proceso les hace pensar que deben monitorizarla en todo momento. Al principio de la actividad, el profesor les había preguntado si la cantidad de energía intercambiada depende o no de la masa del sistema, lo que pudo hacer pensar a los alumnos que no se puede perder de vista la influencia de la masa. Durante el debate en pequeño grupo, los estudiantes recurrieron al guion de trabajo de la actividad de indagación *Fp05* como apoyo para desarrollar el diseño de la experiencia, y Benito, Carlos y Darío se apoyaban en las declaraciones que el profesor había realizado en la sesión anterior, cuando se había discutido la naturaleza extensiva de la entalpía.

Rodrigo puso de manifiesto que no era necesario comprobar la variación de masa del sistema, porque ninguna de las sustancias involucradas es gaseosa y la temperatura no llega a elevarse tanto como para que la evaporación deje de considerarse despreciable. Entonces Carlos mostró su perplejidad:

[Carlos]: Rodrigo, pero ti dixeches antes que a masa era importante.

Sobre la relación entre el calor que se iba a determinar y el calor específico del sistema, los alumnos tenían claro que debían utilizar el calor específico del agua,

aunque no aportaron razones para sustentar esta afirmación.

En cuanto al material de laboratorio, no hubo dudas en la necesidad de un termómetro para medir la temperatura en los estados inicial y final; pero no tenían tan claro en qué tipo de recipiente convendría disolver el NaOH. Adela (del grupo G_A y repetidora de 2º curso) fue la primera en nombrar como "calorímetro" al vaso Dewar que utilizarían en la actividad *Fp08*. Carlos apoyó su respuesta:

[Carlos]: Nun calorímetro, porque aí (Señalando un vaso de precipitados,) a temperatura vai subir pouco... a calor, vai subir pouco.

Rodrigo les preguntó si al realizar el experimento se encontrarían con una variación de temperatura diferente de la esperable (ideal), y solamente se generaron respuestas rápidas en G_A, aunque Adela no intervino. Alfonso manifestó sus dudas:

[Alfonso]: ¿Mayor?

[Ana]: Menor.

Se dio paso entonces a un debate en gran grupo para introducir el concepto de equivalente en agua del calorímetro, que después utilizarían en las actividades *Fp08* y *Fp09*. Al pedírseles que diseñaran una experiencia para conocer el error que introduce el calorímetro en la medida del calor real involucrado en el proceso, Darío propuso medir la temperatura máxima que alcanzara el calorímetro, insertando un termómetro en la pared del mismo. El docente les presentó el proceso más habitual para la determinación de los equivalentes en agua: la mezcla de dos volúmenes conocidos de agua, uno a temperatura ambiente y otro cercano a la ebullición. Al preguntarles por la temperatura final de este sistema, Brais propuso calcular la media aritmética entre las temperaturas iniciales.

Se ilustra a continuación la diferencia entre las manifestaciones iniciales y finales más adecuadas y completas (Ana) y menos adecuadas y completas (Brais):

B. Propón y explica alguna estrategia para conocer el calor asociado a la disolución del NaOH en agua.

[Ana (razonamientos similares: Alfonso, Carlos, Berta, Adela, Clara, Darío, Débora)]: Necesítase medir a masa do NaOH e da auga cunha balanza. Necesítase un calorímetro, xa que este reduce as pérdidas de calor e un termómetro para medir a temperatura.

Habería que empregar a fórmula: $\boxed{Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T}$, onde este calor sería igual á variación de entalpía.

[Brais]: Medir as masas e as T° no Estado 1 e no estado 2.

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Ana (razonamientos similares: Alfonso, Clara)]: Despois das explicacións do profesor, comprendín que nesta actividade temos 2 estados: o estado 1 formado por $NaOH_{(s)}$ e $H_2O_{(l)}$ e o estado 2, formado por $Na_{(ac)}$ e $OH_{(ac)}$. Para realizar a actividade só é importante medir a masa do estado 1.

Ademais dos 100 g da disolución, habería que sumar o equivalente en auga do calorímetro para poder resolver o problema.

Nun sistema ideal a Q da auga fría + Q da auga quente sería igual a 0.

A temperatura real é menor que a temperatura ideal porque o calorímetro absorbe enerxía nun proceso de calor.

O equivalente en auga do calorímetro serve para compensar as perdas de enerxía-

$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T - Q_{cal}$ → pérdidas do calorímetro

↓

Como non se pode medir este proceso hai que facer 1º o experimento da auga quente e da auga fría para coñecer as perdas do calorímetro.

[Brais]: (Sin respuesta.)

En cuanto al apartado C de la actividad, sobre las informaciones y precauciones que se consideran convenientes para la realización de la calorimetría, el profesor decidió que los alumnos debían buscar fuera del aula la información más relevante sobre los materiales y sustancias que iban a utilizar. Al día siguiente se comprobó que ninguno de once estudiantes anotó en su producción escrita una información diferente a la que se había tratado en clase. Brais, Carlos, Berta y Diana no respondieron a este apartado, y las manifestaciones de los demás se reducen a una escueta descripción del material y las tareas a realizar. De ellos, cuatro alumnos desarrollan alguna idea relacionada con el error experimental: Benito, Adela y Débora exponen el concepto de equivalente en agua del calorímetro, y Darío considera que si se utiliza correctamente el termómetro no se comete error en la medida:

C. ¿Qué otras técnicas, precauciones e información consideras necesarias o convenientes antes de llevar a cabo tu estrategia para determinar el calor de disolución del hidróxido de sodio? Justifica tu respuesta.

[Darío]: Como precaución debemos de medir a T_i moi ben, para que non exista ningun erro.

Solamente Ana, Alfonso y Clara generaron manifestaciones escritas posteriores a la intervención del profesor. En ellas, hacen referencia a las correcciones que se deberían aplicar a los cálculos para tener en cuenta el error debido a la energía que no se puede determinar directamente porque se absorbe en las paredes del calorímetro.

Finalizada la sesión, el profesor y la investigadora esperaron a que los alumnos desalojaran el laboratorio, con la finalidad de preparar el material para la determinación calorimétrica. Rodrigo comentó que su opinión sobre el desarrollo de la actividad era positiva, por dos motivos: porque esperaba menos respuestas y más inseguras por parte de unos alumnos que nunca habían diseñado experimentos y habían realizado muy pocos, y porque los veía motivados para trabajar con material de laboratorio y comprobar por sí mismos los efectos energéticos de un proceso real. Al mismo tiempo, manifestó sus dudas sobre la posibilidad de que buscaran en libros o en Internet la información que se les había solicitado. De acuerdo con su experiencia personal, a aquellas alturas de curso los estudiantes solían exteriorizar cierto agobio por los exámenes de evaluación y bastante cansancio por el "atracón" de varios días de estudio continuo, y, en caso de que se les preguntara por qué motivos no hacían los deberes, alegaban los exámenes de evaluación no les dejaban "tiempo para más".

La siguiente sesión comenzaría retomando las informaciones y precauciones necesarias para llevar a cabo la determinación calorimétrica del proceso de disolución del hidróxido de sodio en agua (*Fp08*).

III.2.2.8. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp08*: determinación del calor de disolución del $NaOH_{(s)}$

En la *Tabla 20* (***Volumen A***) se transcribe el guion de *Fp08* a partir del original que se facilitó a los alumnos. En esta actividad, los estudiantes se distribuyen en pequeño grupo para llevar a cabo la experiencia calorimétrica que diseñaron y planificaron en *Fp07*. El objetivo de *Fp08* es que los alumnos pongan en juego destrezas, estrategias y técnicas necesarias para hacer, analizar, discutir y comunicar experimentos científicos. Para ello, se les propone que realicen por sí mismos, bajo la supervisión del profesor, varias acciones que son clave en el trabajo científico y que además aparecen en el currículo oficial para la asignatura de Física y Química de 1º de Bachillerato (XUGA, 2008): la utilización de la balanza o del granatario para la pesada de sustancias sólidas, la medida de volúmenes de líquidos en material graduado (en probeta o vaso de precipitados) y el uso del termómetro como instrumento de medida de la temperatura. Además, en esta actividad se pide a los alumnos que utilicen un calorímetro, ya sea un vaso Dewar o un vaso de precipitados recubierto por material aislante, como corcho o polietileno.

Antes de comenzar la experiencia y en todo momento, deben tener en cuenta

que el trabajo científico requiere pulcritud, transparencia comunicativa, rigor científico y ciertas medidas de seguridad e higiene, necesarias para una práctica científica sin riesgos personales y medioambientales con una calidad aceptable de resultados. El docente se asegurará de que los alumnos manejan de manera adecuada, meticulosa y prudente las sustancias químicas y el material e instrumental de laboratorio.

Un aspecto importante en la *praxis* experimental en Ciencias que pocas veces se hace explícita en el laboratorio de enseñanza secundaria, es la gestión de los residuos producidos como consecuencia de los experimentos. En *Fp08*, la disolución resultante se utilizaría en el desarrollo de la siguiente actividad, así que el docente puede elegir si prefiere comentar la gestión de los residuos durante la implementación de *Fp08*, o postergar el tema hasta *Fp09*.

El guion de trabajo se ha elaborado de tal manera que los estudiantes dispongan de espacio para anotar todas las acciones que se realicen, el material utilizado y las observaciones pertinentes; pero se recomienda al profesor que los anime a esforzarse en este sentido y los ayude a identificar la información relevante.

También se pretende que los alumnos expliciten y desarrollen estrategias, técnicas y destrezas relacionadas con la obtención de resultados científicamente válidos a partir de cálculos matemáticos sobre los datos experimentales. Consideramos conveniente que el análisis y la comunicación de los resultados se realice mediante un debate en gran grupo donde se expongan y analicen los resultados obtenidos por los distintos grupos de trabajo, así como los errores asociados a las características de la experiencia realizada, a la precisión del instrumental y a las habilidades manipulativas. Se enfatizará en la necesidad de conocer con detalle las causas de las discrepancias que se observan en los resultados obtenidos, y se ayudará a los estudiantes a emitir juicios de valor sobre la fiabilidad y las limitaciones de la investigación realizada.

Aunque sería conveniente que los alumnos efectuaran al menos tres réplicas de la calorimetría, en 2º de Bachillerato está muy restringido el tiempo que se puede dedicar a repetir experimentos. Como *Fp08* se implementó en febrero, Rodrigo optó por que todos los grupos de trabajo utilizaran las mismas cantidades de sustancia en sus experiencias, lo que sería útil para trabajar sobre los distintos resultados obtenidos como si fueran varias réplicas del mismo experimento, aunque sería necesario hacer explícito en el aula que parte de las diferencias se deben a la utilización de distintos calorímetros.

A lo largo de la actividad, los alumnos realizaron las siguientes tareas: en primer lugar, midieron las cantidades requeridas de NaOH y agua, y las anotaron en sus guiones de trabajo. Realizaron la experiencia y anotaron la temperatura máxima alcanzada por la disolución dentro del calorímetro cerrado. Después, utilizaron los datos experimentales obtenidos para calcular la variación de entalpía

asociada al proceso (apartado A), con la cual se cuantifica el calor involucrado en la disolución. Tras la puesta en común de los resultados de los distintos grupos, se analizaron las discrepancias que se observaron entre ellos (apartado B).

La actividad comenzó con las advertencias de seguridad necesarias para manipular el material de laboratorio y el hidróxido de sodio. Al principio de la sesión, faltaban Carlos (G_C) y Alfonso (G_A), así que Clara (la otra alumna de G_C) se sumó al grupo de Ana y Adela (G_A). Alfonso apareció cinco minutos más tarde, y Rodrigo decidió reubicarlo con Clara en un grupo distinto, al que se uniría Carlos en caso de que llegara a tiempo a clase (y así sucedió). Los alumnos se dispusieron en los grupos y leyeron el guion de trabajo.

La primera dificultad que se presentó fue el montaje del termómetro en la tapa del calorímetro. Rodrigo tuvo que verificar mesa por mesa si el encaje del termómetro era o no adecuado, y ayudó a Ana y Adela a realizarlo. Darío observó que el termómetro marcaba la temperatura ambiente e intentó bajarlo mediante agitación, estrategia inadecuada que es una manifestación del aprendizaje realizado en contextos familiares, en referencia al termómetro clínico (Domínguez Castiñeiras, 2000). Sorprendido de no lograr su objetivo, Darío se encogió de hombros e insertó sin más el termómetro en la tapa del Dewar (recordemos que era el alumno partidario de medir "muy bien" la temperatura para no cometer error experimental).

En cuanto a la estrategia para medir los 100 ml de agua, los alumnos tuvieron dudas sobre cómo comprobar el enrasado de la probeta fijándose en el menisco formado por el líquido:

[Berta]: Para facer a medida (se refiere al enrasado de los 100 ml en la probeta), ¿a liña ten que estar así (hace un gesto con el dedo en el aire para indicar un menisco convexo) ou así (cóncavo)?

Se presentaron dificultades en la pesada del NaOH sólido, tarea a la que estaban muy poco habituados. Daban exagerada importancia a escoger una por una las lentejas de NaOH para realizar una pesada lo más exacta posible, olvidándose de que al tardar tanto tiempo en medir la masa introducían un error significativo en la medida, debido al carácter higroscópico de la sustancia. Ante la imposibilidad de pesar con total exactitud la cantidad de NaOH que se les pedía, Adela preguntó:

[Adela]: ¿Puede pesar unaaa... masa de sobra?

Tampoco tuvieron en cuenta que las sustancias químicas, una vez extraídas del recipiente comercial, no deben devolverse a él, y Ana y Darío restituyeron al recipiente varias lentejas de NaOH sobrantes mientras Rodrigo se esforzaba por salvar los termómetros de los repetidos intentos de otros por bajar la temperatura agitando el instrumento:

[Berta]: ¿Cómo se baixa? (Agitando el termómetro.)

[Profesor]: (Avanzando hacia ella.) ¡Noo! Eso non-se-baixa, está donde ten que estar.

Clara recibió las críticas de sus compañeros por los más de dos minutos que tardó en pesar los 4 g de NaOH de su grupo. Ante las recriminaciones, se defendió:

[Clara]: No es mi culpa, yo nunca hice esto.

Como observaron que la masa de NaOH acumulada sobre el vaso de precipitados comenzó a aumentar apreciablemente sin que Clara añadiera nuevas lentejas de sosa, los compañeros agrupados alrededor del granatario comenzaron a hacer gestos de fingida desesperación, hasta que Rodrigo llegó al grupo e intervino:

[Carlos]: "¡Hala, hala!"

[Profesor]: Tira con todo, anda.

[Clara]: ¡Es que empezó a subir de repente!

También Débora tardaba mucho tiempo en realizar la pesada, y la observación del aumento de masa inspiró en Brais un método para medir con la mayor exactitud posible: dejar de añadir sosa, y esperar unos segundos a que el granatario marcase los 4,000 g de masa.

[Brais (A Débora.)]: ¡Espera espera espera! Mira que casi llegaaaaa… ¡Uuuy! (inaudible.) Quítale algo.

[Berta (Haciendo gestos de cansancio.)]: No que ya está. Hala. Con cuidado.

No se presentaron dificultades para añadir el agua y el hidróxido sódico al calorímetro y taparlo, pero sí a la hora de agitar la mezcla para disolver el NaOH. Ninguno agitó con el termómetro (quizá porque éste estaba firmemente atravesado en la tapa de corcho del Dewar), pero se miraban unos a otros esperando que alguien consultara la duda con el profesor. Finalmente, Berta tomó la iniciativa:

[Berta]: Pero hai que axitalo primeiro, ¿no?

[Profesor]: Axítase todo xunto.

Las temperaturas máximas fueron 22 ºC (G_B), 23 ºC (G_D) y 24 ºC en los dos grupos restantes, el de Ana y Adela y el de Alfonso, Carlos y Clara. Cuando el profesor preguntó a qué se debía que hubiera hasta 2ºC de diferencia entre las temperaturas finales, Benito comentó jocosamente que los que obtuvieron 24 ºC debían de haber tomado mayor cantidad de NaOH de la prescrita:

[Benito]: Eso es que se pasaron. ¡Uuuuuh!

[Ana]: (Enfadada.) ¿Cómo que nos pasamos de qué, si hicimos todo bien?

Salvo Débora, todos incluyeron en sus guiones de trabajo la temperatura

final del sistema, junto con la temperatura inicial (18 ºC) y la cantidad de hidróxido de sodio utilizada. Débora mostró una actitud de apatía y desinterés, participó poco en el trabajo manipulativo y argumentativo de su grupo, no realizó ninguna aportación a las preguntas del profesor y no recogió en su guion de trabajo ni siquiera los valores de temperatura inicial y final de la experiencia.

El desarrollo de *Fp08* se realizó en media sesión, y el tiempo restante de ésta se dedicó a la experiencia calorimétrica de la actividad *Fp09*. Al terminar la clase, el profesor encargaría a los alumnos que calcularan en casa las variaciones de entalpía de los dos procesos estudiados (apartados A de las dos actividades). En la sesión siguiente se retomó *Fp08*, y Rodrigo propuso anotar la pizarra una tabla con los resultados de los distintos grupos, para poder compararlos. Se encontró con que los alumnos evitaban comunicar sus resultados:

[Adela]: Yo los estoy buscando (en su carpeta.)

[Darío, Clara e Carlos]: (Se miran entre ellos y niegan con la cabeza.)

[Profesor]: A ver, ¿algún resultado?

[Ana]: Yo no sé si me va bien, pero me da menos mil trescientos dos Julios por mol.

Desagradablemente sorprendido, Rodrigo preguntó por qué no habían hecho los deberes, habiendo tenido todo un fin de semana para resolver unos cálculos fáciles que no pasan de las diez líneas de extensión por actividad. Las respuestas de los alumnos son indolentes:

[Profesor]: ¿Algunha razón para non facelos?

[Carlos]: (Silencio.) Examen.

[Profesor]: Ben, ¿e? ¿Para aprobar unha suspendemos outra?

[Brais]: Sí. Quen suspenda. (Débora se ríe.)

Al profesor le disgustó la actitud prepotente de Brais y Débora, que hacían gestos de desdén, y advirtió que para aprobar la asignatura de Química no basta con cubrir un examen rutinario sobre formulación y operaciones aritméticas, y que el trabajo del día a día es bastante más importante a la hora de evaluar. Les recordó que la práctica de calorimetría es una de las prescriptivas en las pruebas de Selectividad y que, vista la seriedad y el esfuerzo que demostraban en su trabajo, a aquellas alturas de la evaluación estaban todos suspensos salvo Ana. Los alumnos no replicaron, realizaron en silencio los cálculos que debían haber hecho durante el fin de semana. La única que se negó en redondo a trabajar fue Débora, que después de ese día no volvió a asistir a ninguna sesión de la unidad didáctica *Termoquímica*. Por esta actitud de renuncia al aprendizaje, en el análisis de esta actividad y las siguientes hemos etiquetado las manifestaciones de Débora como "No realiza la actividad" en lugar de "Sin respuesta". En rigor, sí asistió a las dos sesiones

dedicadas a esta actividad y la siguiente, pero la ausencia de manifestaciones orales y escritas no permite determinar si se produjo una evolución en sus conocimientos.

El profesor dejó trabajar a los alumnos durante unos minutos, en los que se guardó un silencio casi absoluto y cada uno escribía y borraba comentarios en sus guiones de trabajo. Después de siete minutos, preguntó a Adela y Alfonso qué variación de entalpía obtenían, y éstos respondieron que no llegaban a ningún resultado porque no conocían el calor específico. Rodrigo, contrariado, les recordó que en la actividad *Fp07* habían decidido tomar el calor específico del agua como aproximación válida al de la disolución; entonces Adela sacó la calculadora de su mochila. Tres minutos después, Brais, Berta y Clara no tenían todavía el resultado de los cálculos.

Rodrigo decidió que no valía la pena esperar más y abrió el tiempo de debate en gran grupo, pidiendo a Ana que escribiera sus cálculos en la pizarra. Él, por su parte, comenzó a recoger en una tabla los valores de ΔH de los distintos grupos.

En el apartado donde se describe el desarrollo de *Fp05* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp05: calor de reacción, a V = cte y a p = cte*, pág. 623) ya hemos aludido a las dificultades para expresar los valores de las variables termodinámicas utilizando la simbología matemática, y en el apartado correspondiente a *Fp06* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp06: utilidades de la entalpía y de su variación*, pág. 632) se apuntaron algunos obstáculos sobre la resta de valores para expresar la variación de una magnitud. En *Fp08*, las manifestaciones iniciales del alumnado sobre el cálculo de la variación de entalpía correspondiente a la disolución del hidróxido de sodio revelan una gran cantidad y variedad de ideas alternativas relacionadas con la manipulación matemática de magnitudes físicas.

La primera idea alternativa de la puesta en común apareció cuando el profesor preguntó a Adela qué resultado había obtenido para la variación de entalpía. Adela aportó su valor de ΔH, y añadió:

[Adela]: Pero yo no sé si me va mal, porque sólo puse la masa del NaOH. Y había que poner también la masa del agua, ¿no?

Sorprendido, porque el resultado tenía un valor elevado a pesar de que Adela había utilizado un valor de masa demasiado pequeño, Rodrigo pidió a la alumna que explicase cómo había hecho los cálculos. Adela no respondió directamente a la cuestión, sino que releyó durante unos segundos sus apuntes y aventuró:

[Adela]: ¿Pero la temperatura no tiene que estar en Kelvin?

A continuación se transcriben las manifestaciones iniciales de Adela, en las que se observa cómo *pasó a Kelvin* la variación de temperatura que había calculado en grados Celsius: sumó al valor de ΔT el valor 273 de conversión de ^{o}C a K. Se

añaden a estas manifestaciones los cálculos iniciales de su compañero de grupo Alfonso, que son una copia mal transcrita de los de Adela:

A. Calcula la variación de entalpía asociada al proceso que has realizado. ¿En qué unidades crees que es conveniente expresar el resultado? Justifica tu respuesta.

[Adela]: $\Delta H = Q_p$

$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$

$Q = 104 \cdot 4'18 \cdot (4 + 273)$

$\Delta H = -120417'4$ julios.

[Alfonso]: $Q = m \cdot C_e$

$Q = (4 + 273) \cdot 4'18$

Q = 4680 (4 °C de variación) (…)

Ninguno de los alumnos utilizó en sus cálculos la corrección correspondiente a la energía absorbida por el calorímetro.

Después de las indicaciones del profesor, Adela borró sus cálculos y los realizó nuevamente con la masa adecuada. Alfonso añadió la corrección sin eliminar las primeras manifestaciones.

Ana realizó sus cálculos a partir de los 4 g de masa del hidróxido de sodio, y cuando el profesor le recordó que no solamente la masa de NaOH absorbe energía, sino toda la disolución, Ana borró sus cálculos y los rehizo tomando como masa de la disolución 142 g, que se corresponden con los 100 g de agua y los 42 g que el enunciado de la actividad propone como equivalente en agua del calorímetro. Darío utilizó para sus cálculos solamente la masa del agua, despreciando la de NaOH.

La idea que sí utilizaron todos fue la aplicación del calor específico del agua, expresado en cal/g ^{o}C o en J/g ^{o}C.

Después de clarificar las dudas sobre los cálculos matemáticos, el profesor abrió un debate en gran grupo para discutir cómo debían presentarse los valores de la variación de entalpía. A pesar de que los alumnos llevaban varios cursos trabajando con las normas de redondeo y utilización de cifras significativas, pareció sorprenderles el hecho de que sus expresiones iniciales no fueran adecuadas. Después de la intervención, la mayoría incorporó a sus manifestaciones finales casi todas las ideas tratadas en la puesta en común, salvo la aplicación de las cifras significativas a los resultados, que únicamente Berta aceptó.

En la *Tabla 1* se recoge una transcripción directa de los valores y unidades

utilizados por los alumnos antes y después de la intervención del profesor. Las expresiones recogidas en la columna de **Valor de Δ*H* final** no se corresponden con las respuestas al apartado C de la actividad, porque nadie incluyó en él el valor de Δ*H*. Los **Valores de *q* ó Δ*H* final** se extraen de las correcciones que los estudiantes escribieron en sus respuestas al apartado A.

Tabla 1: expresión de los resultados de la determinación del calor asociado al proceso de disolución de NaOH, por transcripción directa de las manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp08

GRUPO	ALUMNO	VALOR DE *q* ó Δ*H* INICIAL	VALOR DE *q* ó Δ*H* FINAL
Ana y Adela	Ana	-3561'36	–35613'6 J/mol
	Adela	–120417'4 julios	–120417'4 julios
Alfonso, Carlos y Clara	Alfonso	-4080 (4 ºC de variación)	-4080 J / 4 g de NaOH
	Carlos	26083'2 J/mol	26083'2 J/mol
	Clara	2608'32 J	-26083'2 J/mol
Brais, Benito y Berta	Brais	–19562'4 J/mol	–19562'4 J/mol
	Benito	–19562'4 J/mol	–19562'4 J/mol
	Berta	–19562'4 J/mol (~19,6 KJ)	–19'6 KJ/mol
Diana, Darío y Débora	Diana	–21736 J/mol	–21736 J/mol
	Darío	–21736'2 J/mol	–21736'2 J/mol
	Débora	*No realiza la actividad*	*No realiza la actividad*

En sus manifestaciones iniciales, Carlos y Clara omitieron el signo negativo de la variación de entalpía. Todos utilizaron unidades adecuadas, y seis de ellos expresaron el carácter extensivo de la entalpía mediante las unidades J/mol (con referencia de 1 mol de NaOH). Sólo Berta utilizó los kJ/mol, múltiplo más apropiado al rango de valores en que se trabajó.

Las manifestaciones finales revelan que la intervención del profesor ayudó a los alumnos a ser conscientes de la necesidad de presentar los resultados de manera más clara y rigurosa, y aunque cinco no modificaron sus manifestaciones iniciales, los que lo hicieron eran los que habían expresado los resultados de manera menos adecuada. El signo de la variación de entalpía sigue el convenio internacional en todos los casos, excepto en el de Carlos. Salvo Adela, en sus manifestaciones iniciales todos hacen explícito que la entalpía es una magnitud extensiva; la referencian al mol de NaOH, con excepción de Alfonso, que prefiere los 4 g de masa. Solamente Berta adopta el kJ/mol como unidad más adecuada, los demás optan por los J/mol.

Terminado el desarrollo del apartado A de la actividad, el profesor propuso unos minutos de trabajo en pequeño grupo para discutir la concordancia de los resultados obtenidos de las distintas "réplicas" del experimento. Entre las ideas más relevantes del debate sobre el error experimental, Adela afirmó que el valor del calor específico que habían utilizado no era el de la disolución real, sino el del agua pura. Darío consideró que otra contribución al error estaba en referenciar la

variación de entalpía al número de mol de NaOH, lo que para él hacía que ya no se tuviera en cuenta la masa de agua. Ninguno identificó la desviación debida a la absorción de energía por parte de las paredes del calorímetro, a pesar de que esta idea se había hecho explícita cuando se realizó el diseño experimental. Las manifestaciones escritas iniciales revelan que a los estudiantes les costaba atribuir las diferencias en los valores experimentales a unas causas que fueran más allá de los incrementos de temperatura de cada grupo:

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer sobre la concordancia de tus resultados con los de tus compañeros?

[Ana (razonamientos similares: Adela)]: As cantidades de temperatura varían nos traballos ata 2 °C, aínda que as diferencias son moi altas dun traballo a outro.

Por exemplo, no meu traballo, cunha variación de temperatura de 6 °C, o resultado é de –356'13 J/mol e noutro caso, cunha diferencia de 5 °C o resultado é de –21736 J/mol.

[Darío]: Que variaron debido a que houbo unha variación tanto nas medidas como nos cálculos.

Un fallo moi importante foi o erro á hora de coller a masa.

Solamente Ana, Adela y Darío dejaron en el apartado B constancia escrita de las ideas discutidas en pequeño grupo, quizá por considerar que, con la realización y corrección pública de los cálculos, la actividad quedaba zanjada. En el espacio sobrante de los cálculos del apartado A, Alfonso incluyó un par de apuntes sobre las causas del error al que estarían sometidos sus resultados:

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer sobre la concordancia de tus resultados con los de tus compañeros?

[Alfonso]: - Estamos supoñendo que o C_e da auga e da disolución é o mesmo

- O C_e do calorímetro

En la puesta en común se apuntaría la posibilidad de que hubieran introducido error otros factores, como la utilización inadecuada del instrumental o la imprecisión de las suposiciones realizadas sobre las condiciones del entorno:

[Benito]: ¿Que non miramos ben o termómetro?

[Alfonso]: ¿Que estamos supoñendo que a presión é constante?

Rodrigo tuvo que ayudarles a centrar su atención en la cantidad de energía que no fue absorbida por la disolución y, por tanto, no se detectó en el aumento de temperatura. Entonces Darío afirmó que el calorímetro también absorbe energía, y a partir de esta idea se desarrolló la necesidad de corregir los cálculos realizados en el

apartado A para tener en cuenta aquellas transferencias de energía que no se habían cuantificado mediante el experimento. El profesor explicó que la absorción de energía por parte del calorímetro no puede despreciarse salvo que se trabaje con grandes cantidades de sustancia, en cuyo caso las pérdidas de energía en las paredes del calorímetro son varios órdenes menores que las transferencias energéticas detectadas. Como la experiencia se había realizado en un vaso Dewar con buen aislamiento, se consideraron despreciables las pérdidas de masa del sistema debidas a la evaporación de agua.

Después de la intervención del profesor, los alumnos tuvieron unos minutos para corregir sus cálculos e incluir la energía absorbida por el vaso Dewar, antes de pasar a comentar los resultados de la calorimetría de *Fp09*. Las manifestaciones finales muestran que los alumnos dieron poca o ninguna importancia a mejorar sus respuestas, y solamente tres respondieron al apartado C de la actividad. Como no habían completado en casa los cálculos de *Fp09*, se dedicaron a terminarlos, y de nada valieron las advertencias del profesor sobre la necesidad de que respondieran a la cuestión del error cometido en *Fp08*. Las únicas manifestaciones realizadas corresponden a Ana, Adela y Darío, y, como se observa en la transcripción siguiente, no condujeron a un mejor análisis de los resultados experimentales. Solamente las de Darío hacen referencia al equivalente en agua del calorímetro, pero no desarrolla sus ideas para corregir sus cálculos y obtener resultados más precisos:

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Ana (respuesta similar: Adela)]: Para calcular o calor específico, a masa que se usa é a masa do NaOH + a masa da auga.

[Darío]: Que temos que ter en conta o calor de H_2O e a absorvida polo calorímetro

Al final de la sesión, el profesor encargó a los alumnos la realización de un informe de prácticas en el que recogieran las tareas realizadas en el laboratorio, el material utilizado y las incidencias observadas en los experimentos. Los informes de prácticas se entregarían el día del primer examen tradicional de la segunda evaluación (*Descripción del examen tradicional realizado tras la implementación de la unidad didáctica Termoquímica*, pág. 710). Después de clase, en reunión con la investigadora, Rodrigo hizo balance de las prácticas de calorimetría y sacó en conclusión que los alumnos habían trabajado "a remolque" de lo que les iba exigiendo, convencidos de que no tenían que hacer más esfuerzo después de recoger los materiales del laboratorio. No veía ninguna conexión entre la falta de esfuerzo por corregir las tareas "dadas por terminadas" y la nueva dinámica de trabajo, porque los profesores consideraban, independientemente de la metodología

didáctica, que era poco menos que imposible lograr que los estudiantes revisen cualquier tipo de tarea "ya corregida en clase": simplemente se limitaban a copiar la "respuesta correcta" en sus cuadernos. En las entrevistas realizadas a los demás docentes que impartían clase a este grupo, estas impresiones se vieron confirmadas por todos. Por ejemplo, Amalia, profesora de Lengua y Literatura Castellana, coordinadora de las actividades de la Biblioteca del I.E.S. y tutora de los alumnos que constituyeron la muestra de investigación, comentó que los profesores se sorprendían a veces de la exagerada pereza de los estudiantes, y que la dinámica de aula se veía frenada o interrumpida constantemente por la falta de trabajo cotidiano de la inmensa mayoría del alumnado. Como muestra de las ideas del profesorado a este respecto, se transcriben las manifestaciones de Amalia, en la entrevista que sostuvo con la investigadora en la Biblioteca del centro, el viernes 22 de mayo de 2009 fuera de horario lectivo, en presencia de Carmen, la profesora de Francés:

[Amalia]: (Sobre el fracaso de la dinámica de aula que la profesora intentaba establecer para los comentarios de texto.) Como no han hecho el texto, esperan a que yo lo corrija para apuntar. ¿Entiendes? Claro. (…) –y, y no hablan al final, ¿qué va, a hablar siempre Ana? Es la única que lo tiene hecho, ¿va a hablar siempre Ana? Termina no hablando. Si aquí hubiese un grupo de ocho o nueve que trabajasen, se podría establecer un coloquio. Pero aquí no hablan porque no hacen las –no tienen nada que decir.

(…) Pero eso sí, tú a continuación te pones a hacer los ejercicios, a revisar, y no dicen: "mira, Amalia, yo esto no me sale. Lo intenté aquí, y no me sale." ¿Cuántos dicen eso? Nadie, porque no lo han hecho. ¿Entiendes? Al que le sale, ya le sale, que son dos o tres. Y los demás ni lo han hecho. Esperan al siguiente ejercicio para copiar, esperan al siguiente, y así todo. Claro, luego llegan al examen y no entienden nada. No entienden nada, dos semanas antes del examen se agobian vivos, y faltan a clase para preparar el examen. No entienden nada, y aún encima han faltado a las clases donde les están explicando lo de los siguientes exámenes.

(…) Luego no les hagas examen en lunes. ¡Olvídate, olvídate! Sabes que no se puede hacer examen un lunes. ¡Un examen un lunes está perdido!, (Se dirige a la profesora de Francés.) ¿verdad, Carmen?

[Carmen]: (Haciendo gestos de rechazo con los brazos.) Oh, oh.

[Amalia]: Bueno, pues eso.

Sobre los trabajos que tienen encargados como deberes, se añade un pequeño extracto de la entrevista realizada a Amalia, en la que ésta comenta el conflicto que tuvo con Darío por el estado en el que éste devolvió un libro de la biblioteca:

[Amalia]: Bueno, pues: (Darío) tenía que leer un libro (para la asignatura de Francés), y no se le ocurre mejor cosa que –aparte de que a quién se le ocurre, en un libro de

la biblioteca– en el libro de Francés, escribir las respuestas, y le entrega eso… ¡¿ése es el trabajo que le entrega, a Carmen?! Pero vamos a ver, ¡hombre!, ¿esto es un trabajo? Y se queda así. (Hace un gesto de ingenuidad.) Dices: "pero vamos, hombre, pero esto… ¿es que os habéis vuelto tontos, de repente?" Claro, que un alumno de 2º de Bachillerato, en mayo, haga eso, pues…

En los apartados correspondientes a la descripción de las actividades siguientes se siguen discutiendo estos aspectos actitudinales. A mitad de la unidad didáctica *Termoquímica*, Rodrigo empezaba a plantearse seriamente la idea de reforzar el "premio académico" para que no decayera el clima de aula que se había logrado en las primeras sesiones, y que amenazaba con derrumbarse por el abandono de Débora y la creciente indolencia de Brais, Carlos y Diana

III.2.2.9. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp09*: determinación del calor asociado al proceso de neutralización entre $HCl_{(aq)}$ y $NaOH_{(aq)}$

En la *Tabla 21* (***Volumen A***) se representa *Fp09*, transcrita del original que se facilitó a los alumnos. Consiste en la realización y análisis de una experiencia mediante la cual se pretende determinar la variación de entalpía asociada a la reacción de neutralización de la base fuerte NaOH y el ácido fuerte HCl, ambos en disolución acuosa. El planteamiento de la experiencia es inverso al de *Fp08*: sobre la base de un guion de trabajo que se presenta *in situ*, los estudiantes deben planificar la realización experiencia haciendo uso de los conceptos y relaciones, las destrezas, estrategias y técnicas que ya pusieron en juego durante la actividad anterior.

Fp09 es la última de las tres actividades encaminadas a que el alumnado adquiera conciencia y práctica sobre las dos planificaciones experimentales más usuales del laboratorio de Ciencias: por un lado, la planificación *ab initio*, sin que el investigador disponga de diseños elaborados por otros investigadores (*Fp07* y *Fp08*), y, por otro, la planificación de experiencias a partir de directrices ofrecidas por otros investigadores (*Fp09*).

En esta actividad, los alumnos se distribuyen en pequeño grupo para realizar la experiencia calorimétrica que se les propone, con el mismo objetivo que la de *Fp08*: que expliciten y desarrollen destrezas, estrategias y técnicas necesarias para realizar, analizar, discutir y comunicar experimentos científicos. El material de laboratorio es básicamente el mismo que ya manejaron en la actividad anterior, y en cuanto a las sustancias químicas, se añade a las ya conocidas (agua e hidróxido de sodio) el ácido clorhídrico. Nuevamente se pondrá de manifiesto la necesidad de detallar las observaciones, los argumentos explicativos y las conclusiones del trabajo experimental, y se observarán actitudes características del trabajo científico, como la pulcritud, la transparencia comunicativa y el rigor científico, además de las medidas prescriptivas de seguridad e higiene. El docente debe asegurarse de que los alumnos manejan adecuada, meticulosa y prudentemente las sustancias químicas y el

material e instrumental de laboratorio, y gestionan de manera adecuada y responsable los residuos que se generan como consecuencia del experimento.

En esta actividad también se incide en el desarrollo de estrategias, técnicas y destrezas relacionadas con la obtención de resultados científicos a partir de datos experimentales. Los resultados se analizan y comunican como en *Fp08*.

Los alumnos realizan las siguientes tareas: en primer lugar, miden las cantidades requeridas de la disolución de NaOH que prepararon en *Fp08*, y de una disolución de HCl que pueden preparar ellos mismos o que, si no se dispone de mucho tiempo o las habilidades manipulativas del alumnado no lo facilitan, puede facilitarles el docente, para que ellos solamente tengan que medir la cantidad de disolución. A continuación, realizan la experiencia y anotan la temperatura máxima alcanzada por la disolución dentro del calorímetro cerrado. Después utilizan los datos experimentales para calcular la variación de entalpía asociada al proceso (apartado A), que cuantifica el calor involucrado en el proceso de disolución. Después de la puesta en común de los resultados obtenidos por todos los grupos, analizarán las discrepancias que se observen entre ellos (apartado B).

La parte práctica de la actividad comenzó inmediatamente después de que los alumnos hubieron terminado la determinación del calor de disolución de NaOH. En cuanto la temperatura observada en la experiencia de *Fp08* comenzó a descender, el docente propuso a los alumnos si tendría algún sentido desechar sus disoluciones y tomar el volumen prescrito de una disolución de NaOH de igual concentración, que él les proporcionaría. Benito respondió inmediatamente:

[Benito]: ¿Porque nós o fixemos a presión constante e ti a volumen constante? (Hizo un gesto de perplejidad y continuó:) ¿Porque xaaa... xa enfriou?

Entonces el docente informó a los alumnos sobre cómo debían gestionar la eliminación de las disoluciones acuosas básicas, y para que midieran la cantidad de NaOH recomendado les proporcionó una disolución de la misma concentración que las anteriores. Les recordó además las advertencias de seguridad necesarias para manipular el ácido clorhídrico, y puso a disposición general una disolución de HCl de la concentración prescrita, para que midieran el volumen recomendado.

Los alumnos, distribuidos en sus grupos de trabajo, leyeron el guion de trabajo y comenzaron a medir con probeta los 100 ml de ácido y los 100 ml de base. Rodrigo les recordó que debían utilizar una probeta para cada sustancia, o bien lavar la probeta entre una medición y otra. Medir los volúmenes de las disoluciones no ofreció dificultades, y tampoco el montaje del termómetro en el calorímetro. La única duda que surgió durante la experiencia fue el orden en el que había que añadir el ácido y la base en el Dewar. Una vez que ya habían mezclado ambas disoluciones, Adela se acordó de las recomendaciones de seguridad sobre la disolución de ácidos minerales en agua:

[Adela]: ¿No tendríamos que haber echao primero... el ácido y después la base?

A instancias de Darío, en su grupo midieron la temperatura inicial de la base y del ácido antes de mezclar ambos, y Darío llamó al profesor a su mesa para preguntar por qué la temperatura de la disolución ácida era ligeramente mayor que la temperatura ambiente. Después de la intervención, el profesor confirmaría a la investigadora que los alumnos no estaban suficientemente familiarizados con el concepto de hidrólisis como para transferirlo en otras situaciones que no tuvieran relación directa con los ejercicios sobre reacciones "clásicas" ácido-base.

No se presentaron obstáculos significativos durante las tareas manipulativas, y los alumnos repartieron razonablemente el trabajo de manera que todos tuvieran alguna tarea que hacer en el grupo. La única alumna que participó poco en el desarrollo de la sesión, como ya se ha comentado en el apartado donde se describe la actividad *Fp08*, fue Débora.

Observaciones sobre los cambios sucedidos en la mezcla de neutralización:

[Ana]: Ó mesturar a disolución básica sobre a ácida prodúcese un aumento da temperatura ata acadar 23 °C.

[Alfonso (razonamientos similares: Adela)]: Está a 19 °C ó botar el NaOH

22 °C ó engadirlle o ácido ó NaOH

[Brais (razonamientos similares: Benito)]: → 19 °C

→ 19 °C [se refiere a las temperaturas iniciales de ambas disoluciones]

[Carlos (razonamientos similares: Berta, Diana, Clara)]: Sin respuesta

[Darío]: A partir dunha base forte e dun acido forte, obtemos unha sal (NaCl) e H_2O. Observamos que se neutraliza o carácter acido (HCl) co basico (NaOH) para conseguir a disolución. Observamos un aumento de temperatura.

Las temperaturas máximas alcanzadas en cada grupo fueron 22ºC (grupo de Alfonso, Carlos y Clara, y $\boldsymbol{G_B}$) y 23ºC (grupo de Ana y Adela y $\boldsymbol{G_D}$). Diana anotó mal la temperatura alcanzada (escribió 22ºC en lugar de 23ºC), pero realizó los cálculos con el valor adecuado.

Terminando la sesión, los alumnos limpiaron y recogieron el material de laboratorio, y eliminaron las mezclas de neutralización por el fregadero, cuidándose de diluirlas con agua. El profesor les encargó que calcularan en casa las variaciones de entalpía de este proceso junto con las de la actividad *Fp08* (apartados A de las dos actividades). Adela consultó con él una duda sobre el método para calcular ΔH:

[Adela]: Rodrigo, ¿cómo podemos calcular la ener… la entalpía con la energía interna – la variación de entalpía – la variación de entalpía con la variación de energía interna?

En la sesión siguiente, después de discutir los resultados y conclusiones sobre *Fp08*, la sesión continuó con el desarrollo del apartado A de *Fp09*, y de nuevo la puesta en común en gran grupo tuvo que simultanearse con el trabajo de los alumnos que se habían quedado rezagados en la realización de los cálculos; recordemos que, después de un fin de semana para realizar los cálculos, solamente Ana había cumplido con las tareas encargadas. Tanto Ana como Darío aportaron sus resultados en calorías/mol:

[Ana]: Porque (el resultado de Fp08) lo pasé (a Julios/mol), y este no me acordé.

Se presentaron nuevamente los problemas con los signos y unidades: Alfonso y Diana aportaron para la tabla de resultados de la pizarra sus datos de ΔH sin signo ni unidades, aunque en sus manifestaciones escritas iniciales sí los habían reflejado correctamente. El profesor aprovechó la puesta en común para tratar de convencer a los alumnos de que tuvieran presentes qué relaciones existen entre los datos:

[Alfonso]: Once mil catrocentos.

[Profesor]: Entendo queee...

[Alfonso]: Joules. E (signo) menos, claro.

[Profesor]: ¿A qué o referenciaches?

[Alfonso]: Xuntei as masas.

[Profesor]: ¿Qué diferencia de temperatura che deu?

[Alfonso]: Non o teño apuntado.

[Profesor]: ¿Cómo? ¿Non tes aí...?

[Alfonso]: Ah, claro, tres grados.

Brais esperó a que llegara su turno de enunciar el resultado, para declarar en voz alta que no había hecho los cálculos. Su respuesta escrita al apartado A estaba totalmente en blanco a aquellas alturas de la sesión, y al final de la puesta en común copió las manifestaciones de su compañero Benito. La actitud de "amotinao" (según Rodrigo) que exteriorizaba Brais no tiene relación directa con un rechazo a la metodología ensayada, porque en las entrevistas a los docentes, la investigadora preguntó qué actitud mantenía este alumno en las distintas asignaturas, y las respuestas de todos los profesores son coincidentes: en todas las materias de las que estaba matriculado, Brais se resistía deliberadamente a trabajar en clase y mostraba un menosprecio bastante manifiesto al trabajo de sus compañeros y del profesor. En

su entrevista, Amalia indicaba los posibles motivos de esta actitud tan negativa hacia su aprendizaje y el de sus compañeros:

[Amalia]: Brais (…) era un niño buenísimo, buenísimo, académicamente y todo, y en actitud y todo. El año pasado le dio un ataque epiléptico. Nunca había tenido ese problema. Entonces, a raíz de eso, le repitieron dos veces aquí los ataques –no saben cuál es el motivo, pero sí lo relacionan con momentos de estrés. (…) Y reaccionó, y él relaciona: "si me estreso, me dan los ataques, con lo cual no me voy a estresar". Está de un pasota este año que no es normal, este niño no era así. ¡Está de un pasota!, y ya sabes lo que hizo en Química, (…) Y además está como incluso en plan chulesco, ya no es… Porque claro, yo como le dije: "vale, si no te quieres estresar, tú no tes estreses, ¡pero!, oye, de ahí…" A mí si me dices, no voy al diez, voy al seis… Pero de ahí a pasar… o sea, y no se presentó. Que tengo que llamar a casa (…) Además es muy reivindicativo, "¿por qué?", no le vale que le des el… (Hace con las manos el gesto de escribir una calificación negativa.) Le tienes que dar… (Hace gesto de escribir una calificación positiva.)

Las manifestaciones iniciales del alumnado sobre el cálculo de la variación de entalpía en *Fp09* revelan las mismas ideas alternativas que se comentaron en el apartado correspondiente a la actividad *Fp08*: problemas para expresar los valores de las magnitudes termodinámicas utilizando simbología matemática, y obstáculos sobre la realización de las operaciones aritméticas básicas.

En la *Tabla 2* se transcriben los valores y unidades utilizados por los alumnos antes y después de la intervención del profesor. Como sucedió con *Fp08*, las expresiones recogidas en la columna **Valor de Δ*H* final** no se corresponden con las respuestas al apartado C de la actividad, porque ninguno de los alumnos incluyó el valor de la variación de entalpía en sus respuestas a esta cuestión. Los ***Valores de q ó* ΔH *final*"** están extraídos de las correcciones que los estudiantes plasmaron por escrito en sus respuestas al apartado A.

Además de Débora, tres alumnos no presentan ninguna respuesta escrita que pueda constituir una manifestación inicial: el ya citado Brais, Carlos y Diana Por su parte, Alfonso y Darío omitieron el signo negativo de la variación de entalpía. Se observan avances con respecto a los resultados de *Fp08*: ya no se presenta inicialmente ningún resultado sin unidades, aunque Ana y Darío dejaron sus resultados en calorías para ahorrarse el esfuerzo de convertirlos a Julios. Cinco alumnos pusieron explícitamente de manifiesto el carácter extensivo de la entalpía al expresar su variación referenciada al mol de NaOH. Además de Berta, que ya había utilizado esta idea en *Fp08*, ahora también Clara dio el resultado de Δ*H* con unidades de kJ/mol, más apropiadas al rango de valores en que se trabajaba.

Tabla 2: expresión de los resultados de la determinación del calor asociado al proceso de neutralización de NaOH sólido con una disolución de HCl, por transcripción directa de las

manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp08

GRUPO	ALUMNO	VALOR DE q ó ΔH INICIAL	VALOR DE q ó ΔH FINAL
Ana y Adela	Ana	–968 cal	–40462'4 J/mol
	Adela	–230736 julios	–230736 julios
Alfonso, Carlos y Clara	Alfonso	25080 J/mol	–25080 J/mol
	Carlos	*Sin respuesta*	–33'4
	Clara	–33440 J/mol	–33440 KJ/mol
Brais, Benito y Berta	Brais	Sin respuesta	–25080 J/mol
	Benito	–25080 J/mol	–25080 J/mol
	Berta	–25'08 Kj/mol	–25'08 Kj/mol
Diana, Darío y Débora	Diana	*Sin respuesta*	–33.440 J/mol
	Darío	10.382'5 cal/mol	–33'74
	Débora	*No realiza la actividad*	*No realiza la actividad*

Las manifestaciones finales revelan que la intervención del profesor tuvo poco éxito a la hora de ayudarles a lograr más rigor en la expresión de resultados científicos: solamente Ana y Clara modificaron sus manifestaciones iniciales, y las modificaciones de Clara llevan a un resultado menos adecuado que el que había obtenido inicialmente. Además, cuatro alumnos copiaron sus resultados de los compañeros: Brais, Carlos, Diana y Darío. Las manifestaciones escritas de Carlos consisten en poco más que la anotación del resultado de sus compañeros:

A. Calcula la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización que has realizado. ¿A qué reactivo referenciarías las unidades de ΔH? Justifica tu respuesta.

[Carlos]: M = nº / V

M = nº / 0'1

nº

-33'4

Sí se logró que al final todos indicaran adecuadamente el signo de la variación de entalpía, aunque no se observa mejoría en la utilización adecuada de las unidades, salvo en el caso de Ana, que convierte su resultado inicial (expresado en calorías) a Julios/mol. De los cuatro alumnos que copian resultados, dos (Carlos y Darío) copian solamente el valor de ΔH con su correspondiente signo, pero sin unidades de medida, y Clara expresa su resultado inicial (J/mol) ahora en kJ/mol ¡sin realizar la conversión! La dificultad para transformar unidades en sus múltiplos o submúltiplos se observa en la pregunta de Berta durante la puesta en común:

[Berta]: Pero digo en Julios. Para pasar a kilojoules, ¿que hay, que dividir entre mil?

En *Fp08*, eran ocho los alumnos que en sus manifestaciones finales hacían explícito que la entalpía es una magnitud extensiva, y la referenciaban al mol de

NaOH o a la masa de NaOH; en *Fp09*, son nueve los que demuestran esta idea. Pero solamente Clara y Berta pasan a adoptar el kJ/mol como unidad más adecuada, frente a los seis de la actividad *Fp08*. En cuanto a la aplicación de cifras significativas al resultado, Berta vuelve a hacerlo, y ahora también Carlos y Darío, aunque sus cálculos no llevan a ello (pero copian el "resultado correcto" con las cifras significativas).

Los resultados de la *Tabla 2* dan una idea de las dificultades relacionadas con la atribución de valores correctos a las magnitudes termodinámicas y con la realización de operaciones aritméticas básicas. Hay diferencias sustanciales entre los resultados obtenidos por alumnos del mismo grupo, que basaban sus cálculos en los mismos datos experimentales. El profesor puso de manifiesto estas disparidades y ayudó a los estudiantes a indagar en sus causas. Como en la actividad anterior, la identificación de la masa del sistema fue problemática también en *Fp09*, aunque los estudiantes habían superado la idea de que solamente la masa de soluto absorbía energía. En *Fp09*, la idea alternativa más extendida en las manifestaciones iniciales fue la suma de las masas de HCl y NaOH disueltos (4 g y 4 g, respectivamente) a la masa total de disolución (100 ml + 100 ml), que ellos consideraban "masa del agua". La masa total del sistema, para Ana, Benito y Darío, era de 207 g:

[Ana]: Pues yo creo que es por la masa, que a lo mejor la tengo mal, porque por otra cosa... También dividí por 0,1.

[Darío]: Eu puxen de masa 207.

En sus manifestaciones finales, todos utilizaron el valor adecuado para la masa del sistema, salvo Ana, que añadió a los 200 g de disolución los 42 g de "masa del calorímetro":

A. Calcula la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización que has realizado. ¿A qué reactivo referenciarías las unidades de ΔH? Justifica tu respuesta.

[Ana]: Calorímetro = 42 g

$\Delta T = 23 - 19 = 4°C$

$M = n / V$

$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T = 242 \cdot 1 \cdot 4 = -968$ cal

$1 = n / 0'1$

-968 cal x 4'18 J = $-4046'24$ J

n 0'1 moles HCl

1 cal

$\Delta H = \underline{Q} = \underline{-4046'24} = -40462'4$ J/mol

n 0'1

En cuanto a la variación de temperatura, nuevamente Adela sumó 273 a la diferencia de temperatura para "pasarla" de grados Celsius a Kelvin. Diana anotó

incorrectamente 22ºC como temperatura final de la mezcla de neutralización, pero realizó los cálculos tomando como valor final el correcto, de 23ºC.

Todos los alumnos aplicaron en sus cálculos el calor específico del agua, mayoritariamente expresado en cal/g ºC; solamente utilizaron las unidades de J/g ºC Diana, Clara y Darío.

Solamente Diana incluyó en sus cálculos el término de corrección que tiene en cuenta la energía absorbida por el calorímetro. Alfonso lo incluyó en la ecuación, pero no lo desarrolló:

A. Calcula la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización que has realizado. ¿A qué reactivo referenciarías las unidades de ΔH? Justifica tu respuesta.

[Alfonso]: $Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T + C_{calorímetro} \cdot \Delta T$

$= 200 \cdot 4'18 \cdot 3 + 42 \cdot 3$

Reconocieron que en esta reacción ácido-base no hay un reactivo limitante, pero sólo Darío añadió en sus manifestaciones escritas alguna indicación sobre la elección de un reactivo para referenciar los resultados de ΔH:

[Alfonso]: A primeira vista, no (existe reactivo limitante).

A. Calcula la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización que has realizado. ¿A qué reactivo referenciarías las unidades de ΔH? Justifica tu respuesta.

[Darío]: Referenciaría a base, porque foi a que añadin ao acido, para que se levase a cabo a reacción.

Respondido el apartado A, los alumnos comenzaron unos minutos de debate interno para discutir la concordancia de los resultados obtenidos en los distintos grupos. Identificaron como aproximación la idea de que 200 ml de disolución contuviesen exactamente 200 g de masa, y reconocieron que las demás fuentes de error coincidían con las trabajadas en la actividad *Fp08*. Quizá por esta razón, ocho de los once estudiantes consideraron que este apartado era redundante y se ahorraron el esfuerzo de trabajar sobre él. Se transcriben a continuación las manifestaciones iniciales de los tres únicos alumnos que respondieron: Darío, que en el espacio correspondiente al apartado A escribió la aproximación de la densidad; y Ana y Adela, que anotaron que entre los resultados obtenidos en los distintos grupos existían menos discrepancias que en la actividad anterior:

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer sobre la concordancia de tus resultados con los de tus compañeros?

[Darío]: * Despreciando el volumen de soluto, puedo tomar los 100 ml de la disolución, como de H_2O.

[Ana (razonamientos similares: Adela)]: Neste caso, as variacións de entalpía son máis aproximadas

Solamente Ana y Adela realizaron alguna aportación al apartado C de la actividad; los demás la dieron por cerrada y acabada, a pesar de disponer de suficientes minutos para recoger el material de laboratorio, añadir la corrección del calorímetro a sus cálculos del apartado A y responder al C. Corregidas en público las actividades, consideraron que el esfuerzo que invertido en ellas se terminaba definitivamente. Las anotaciones de Ana y Adela contienen casi explícitamente esta idea: se debería corregir los cálculos para tener en cuenta la energía absorbida por el recipiente, pero ellas no lo harán.

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Adela]: Se parte de los 100 g de HCl y NaOH e lugar de calcular la masa de cada uno partiendo de la molaridad. Ademas en la masa tambien hay que tener en cuenta el calor del calorimetro

III.2.2.10. Aplicación y desarrollo de la a *Fp10*: un poco de orden para ΔH

Mediante las actividades de indagación *Fp10* (*Tabla 22*, ***Volumen A***) y *Fp11*, se pretende que los estudiantes revisen y reestructuren las ideas que se hicieron explícitas a lo largo de las actividades *Fp07*, *Fp08* y *Fp09*. Las siguientes actividades de la secuencia *Termoquímica*, de *Fp12* a *Fp15*, son de aplicación de las relaciones trabajadas, tanto desde el punto de vista del razonamiento como de la acción. El objetivo es que el alumnado trabaje con las relaciones conceptuales que ya conoce sobre el estudio de los procesos termodinámicos, utilizando la variación de entalpía como criterio para analizar las transferencias de energía entre el sistema y su entorno y desarrollando destrezas y estrategias relacionadas con la resolución de problemas científicos, entre las que se incluyen las de manipulación matemática y representación gráfica de las magnitudes termodinámicas para la transformación de datos numéricos.

Considerando, en la línea de Barlet y Mastrot (2000), Teichert y Stacy (2002) y Greenbowe y Meltzer (2003), que la comprensión conceptual debe preceder a la manipulación algebraica, y que una presentación pura o eminentemente algorítmica de los conceptos científicos puede representar un obstáculo adicional en la construcción de un conocimiento funcional y no dogmático, la unidad didáctica *Termoquímica* se ha secuenciado de manera que los problemas que requieren una transformación cuantitativa de datos se plantean una vez que se ha trabajado sobre problemas análogos cuya transformación de datos es meramente cualitativa. Con

ello se pretende que el alumnado se enfrente a la manipulación matemática de las magnitudes termodinámicas una vez que haya tenido ocasión de desarrollar una perspectiva crítica, reflexiva y analítica trabajando el punto de vista cualitativo de las ideas, y que aplique los métodos de cálculo y representación cuando éstos sean realmente útiles, es decir, cuando ayuden a transformar datos cuyo significado científico se entiende.

Fp10 está encaminada a poner de manifiesto la utilidad de ΔH como criterio para conocer las transferencias de energía que acompañan a los procesos (gracias a la posibilidad de organizar los datos experimentales de ΔH en tablas termodinámicas). Se describe cómo se ofrecen los datos de ΔH, los cuales se pueden visualizar en las ecuaciones termoquímicas. También se presentan las claves de la simbología convencional de ΔH, que se completa en la actividad *Fp11*.

Las principales ideas del texto se resumen como sigue: la necesidad de predecir cómo serán las transferencias de energía entre el sistema químico y su entorno nos lleva a elegir una función de estado del sistema (ΔH) cuya variación facilita esta información de manera cualitativa y cuantitativa. Cuantos más datos de ΔH se coleccionan y ordenan, mayor es el número de procesos químicos que se pueden estudiar sin necesidad de recurrir a las técnicas calorimétricas, a partir de la consulta de una tabla termodinámica.

En el aula, *Fp10* y *Fp11* se llevaron al aula en la misma sesión, y se siguieron las directrices programadas en el modelo de diseño y desarrollo de las actividades. La implementación tuvo lugar el día anterior a la celebración del festival de Carnaval del centro, y faltaron a la sesión Carlos, Berta, Adela y Clara. Los demás alumnos se redistribuyeron en dos grupos, uno por cada mesa de laboratorio.

Se comenzó con la lectura individual del texto, que se hizo en silencio. Después, el profesor abrió un debate en pequeño grupo, animando a los estudiantes a discutir y analizar las principales ideas, relacionándolas con las que acababan de trabajar en las actividades anteriores. Rodrigo se acercó a los grupos para ayudar a los alumnos a orientar sus discusiones hacia las transferencias de energía a presión constante y volumen constante. Benito manifestó que la variación de entalpía es igual al calor a presión constante, y Brais respondió a la pregunta sobre qué variación de variable termodinámica es igual al calor a volumen constante: la energía interna.

No tuvieron problemas para reconocer que la naturaleza extensiva de la variable entalpía hace posible la aplicación de ΔH a las ecuaciones termoquímicas. Sí se presentaron dudas con la definición de las funciones de estado: nuevamente, la expresión "depender del proceso" hacía creer a algunos que la energía interna y la entalpía no son función de estado, puesto que adoptan valores diferentes en cada proceso (nuevamente, se presentan dificultades relacionadas con la clasificación

ontológica de los conceptos). Alfonso contraargumentó que sí son función de estado:

[Alfonso]: No, dependen do estado inicial e do final.

No parecieron presentarse dificultades ante la introducción de la simbología formal de ΔH, con la que los alumnos ya se habían familiarizado durante las actividades de determinación calorimétrica. Rodrigo les presentó entonces la actividad *Fp11* como continuación a *Fp10*, y les planteó la necesidad de analizar los fundamentos y el significado de las leyes de la Termoquímica antes de aplicarlas para explicar hechos, situaciones y fenómenos.

Con ello, se cerró el debate en gran grupo y se pasó a realizar la actividad de indagación *Fp11*.

III.2.2.11. Aplicación y desarrollo de la a *Fp11*: las leyes de la Termoquímica

La actividad de indagación *Fp11* (*Tabla 23*, ***Volumen A***) está encaminada a introducir las leyes de la Termoquímica partiendo de la naturaleza de la entalpía, para derivar la posibilidad de aplicar un tratamiento matemático a las ecuaciones termoquímicas, sumándolas o multiplicándolas por constantes y combinándolas linealmente para calcular la ΔH de una reacción de interés a partir de las ΔH de reacciones relacionadas.

También se incide en el convenio que asigna valor cero a la entalpía de los elementos químicos puros en condiciones de 25 ºC y 1 bar. Este convenio ha permitido establecer una escala relativa de entalpías, gracias a la cual los datos de ΔH_f ofrecen directamente el valor de la entalpía del producto formado en las condiciones que se indican en la tabla de datos calorimétricos.

En el aula, esta actividad se desarrolló inmediatamente después de *Fp10*. Como asistían tan pocos alumnos a clase y su participación era irregular, Rodrigo les encargó que leyeran el texto de *Fp11* y construyeran una explicación sencilla sobre el significado de la ley de Lavoisier-Laplace:

[Benito (respuesta similar: Adela)]: Que a enerxía é constante.

[Brais]: Que é a misma co signo cambiado.

Con su respuesta, Benito parecía aludir a que, como la energía no se crea ni se destruye y solamente se transfiere, las transferencias involucradas en un proceso son iguales a las involucradas en el proceso inverso, aunque se producen en sentido diferente (como puntualiza Brais). Dio la misma respuesta cuando Rodrigo preguntó por el significado de la ley de Hess:

[Benito]: ¿Porque a enerxía é constante?

Durante el debate en gran grupo, el profesor recomendó que consultaran la tabla de datos termodinámicos contenida en el libro de texto, que es la que utilizarían como material de referencia bibliográfica para realizar las siguientes actividades de *Termoquímica* y las de *Termodinámica Química*. Rodrigo insistió en la necesidad de no manipular las ecuaciones irreflexivamente, y tener presente los fundamentos que las hacen útiles:

[Profesor]: Se vós sabedes a razón dunha ecuación, non se vos olvida máis.

La sesión se dio por terminada cinco minutos antes de la hora prevista, porque los alumnos no demostraban ningún interés en continuar trabajando una vez que se hubieron explicado las leyes de la Termoquímica. Continuar con el desarrollo de las actividades significaba entrar de lleno en *Fp12* y por lo tanto tener que volver atrás en la sesión siguiente para que los cuatro alumnos ausentes no se quedaran rezagados. En su reunión diaria con la investigadora, Rodrigo manifestó su alivio por haber terminado las actividades de indagación de *Termoquímica*, que de cara a los exámenes de evaluación le exigían "gastar un extra de paciencia para tirar del hilo", porque los alumnos tendían retrasar en lo posible las respuestas a las preguntas teóricas fingiendo que revisaban los apuntes de clase o que anotaban alguna idea interesante. Se mostró optimista sobre el desarrollo de las actividades de aplicación, porque consideraba que ayudarían a los alumnos a adquirir autoconfianza y habilidad en sus destrezas y estrategias, al tiempo que no les requerirían tanto esfuerzo por comprender "demasiadas ideas nuevas". Cuando comenzara la implementación de la secuencia *Termodinámica Química* ya habría pasado la temporada de evaluación, y los estudiantes no acusarían el estrés y el cansancio del *sprint* de exámenes.

En las sesiones siguientes se realizaron las actividades de aplicación de *Fp12* a *Fp15*, para que los alumnos transfirieran sus conocimientos a describir e interpretar los aspectos energéticos de algunos procesos químicos, ayudándose de la transformación matemática de datos termoquímicos. El docente mostró especial cuidado en que los problemas cuya resolución requiere tratamiento numérico no dieran pie a los alumnos a olvidar la comprensión conceptual en detrimento de la manipulación de ecuaciones, y más teniendo en cuenta que en *Fp14* y *Fp15* se abordan problemas cuya resolución demanda la integración de los tres dominios de representación de conocimiento de la Química.

III.2.2.12. Aplicación y desarrollo de la a *Fp12*: ... y sin necesidad de recurrir al laboratorio

En la *Tabla 24* (***Volumen A***) se representa la actividad *Fp12*, transcrita del original que se facilitó a los alumnos. *Fp12* consiste en una demostración de la utilidad de las leyes de la Termoquímica y las tablas de datos termodinámicos, que permiten estudiar las transferencias energéticas de procesos químicos sin que haya

que recurrir a las determinaciones calorimétricas. Al conservarse la energía en las transformaciones y ser la entalpía una función de estado, las ecuaciones termoquímicas pueden sumarse, multiplicarse por constantes y combinarse linealmente de manera que la ecuación termoquímica resultante indique la variación de entalpía asociada a la reacción que se representa en la ecuación resultante.

En esta actividad de aplicación, se propone a los estudiantes que calculen la variación de entalpía asociada al proceso de neutralización entre hidróxido de sodio sólido y una disolución acuosa de ácido clorhídrico. Se pretende que apliquen la ley de Hess a los datos de ΔH que obtuvieron en las experiencias calorimétricas de la disolución de hidróxido de sodio (*Fp08*) y la neutralización de la disolución de hidróxido de sodio con una disolución de ácido clorhídrico (*Fp09*).

La aplicación de la ley de Hess a los datos experimentales se basa en la suposición de que el proceso de estudio sucede a temperatura ambiente y a presión constante, como las determinaciones calorimétricas cuyos valores de ΔH se utilizan como datos para conocer la ΔH de interés: se suman directamente las ΔH asociadas a las determinaciones calorimétricas de las actividades *Fp08* y *Fp09*, porque las transferencias de energía que se producen por calor (ΔH_3) al neutralizar un mol de hidróxido de sodio sólido y un mol de ácido clorhídrico diluido son las resultantes de disolver un mol de hidróxido de sodio en agua (ΔH_1) y neutralizar esta disolución con un mol de ácido clorhídrico diluido (ΔH_2).

En el caso que se plantea, disponer de datos experimentales (o tabulados) evita la necesidad de realizar una nueva experiencia de laboratorio para conocer las transferencias de energía asociadas al proceso global de neutralización. En otros casos, la ventaja de las colecciones de datos termodinámicos es aún mayor, porque permiten el estudio de procesos imposibles de reproducir experimentalmente en las condiciones que exigen las técnicas de determinación calorimétrica.

Fp12 finaliza con una reflexión en gran grupo sobre los resultados obtenidos en el apartado A. Se pretende dotar de significado a las relaciones matemáticas que se establecen entre los datos del problema y los resultados que se obtienen:

Ya se ha comentado en las actividades anteriores que el signo negativo de ΔH_1 y ΔH_2 indica la exotermia de ambos procesos. Comparando los valores se verifica que el proceso 2 es más exotérmico que el 1, y ΔH_3 indica que existe una transferencia neta de energía desde el sistema hacia el entorno, como consecuencia de la disolución del NaOH y su neutralización con HCl. La gran exotermia del proceso 3 se explica como el resultado del balance global de las transferencias energéticas netas que en la reacción química tienen lugar de manera simultánea, pero sobre el papel se analizan como resultado de dos etapas sucesivas (los procesos de las actividades *Fp08* y *Fp09*).

Si los alumnos conocen la solvatación de las sales iónicas en agua y están

familiarizados con el concepto de neutralización, el profesor puede introducir los modelos corpuscular y de enlace en este momento de la intervención, con la finalidad de relacionar la exotermia de estos procesos con la ruptura y la formación de interacciones químicas en el sistema. Aunque la secuencia de actividades, en principio, se ha diseñado de tal manera que la perspectiva microscópica se introduzca en *Fp14*, la decisión de adelantar los modelos microscópicos de la Química queda a juicio del docente.

En el aula, el tratamiento de los modelos de partículas, enlace y reacción química surgió por primera vez en la actividad *Fp03*, en la que los propios alumnos utilizaron relaciones del dominio microscópico para justificar las transferencias energéticas. Tanto en *Fp03* como en otras, se observó que tenían problemas para desarrollar por sí mismos un modelo completo con el que interpretar los procesos químicos, sobre todo en lo que respecta a analizar la estructura química de las sustancias implicadas, a determinar las interacciones que se rompen, y a reconocer que los procesos químicos involucran el establecimiento de interacciones que estabilizan el sistema en un estado que desde el punto de vista macroscópico no evoluciona más. Recordemos que, en la actividad *Fp07*, el profesor intentó que los alumnos aplicaran un modelo de enlace para justificar la exotermia de la disolución, y como la respuesta fue prácticamente nula, el propio Rodrigo tuvo que introducir el modelo. Los estudiantes parecían no recordar el concepto de solvatación de una sal iónica por parte de un disolvente polar, aunque sí reconocían que la liberación de energía se debe a la existencia de interacciones entre el agua y el NaOH.

A la vista de las dificultades encontradas en las actividades anteriores, Rodrigo decidió no desarrollar en *Fp12* ninguna relación sobre los modelos de enlace y reacción química, a menos que los propios alumnos iniciaran el tema. Desde su punto de vista, *Fp12* es una actividad "de tránsito" a *Fp13*, y el conjunto de ambas sirve para comprobar cómo se manejan los alumnos para traducir los datos experimentales al lenguaje matemático, operar con ellos y analizarlos desde el punto de vista termodinámico. Teniendo en cuenta que los alumnos tenían bajos niveles de destreza en el trabajo con magnitudes físicas y en la realización de cálculos, Rodrigo consideraba prioritario afianzar estas destrezas y ayudarles a diseñar, planificar y ejecutar la resolución de problemas científicos que impliquen un tratamiento de datos numéricos. La introducción de relaciones microscópicas implicaría invertir mucho tiempo en superar los obstáculos que se presentarían, y no contribuiría a mejorar la comprensión lo suficiente como para que (en palabras del profesor) "compensara la inversión", justo en un momento en el que valía la pena, a su juicio, desarrollar *Fp12* y *Fp13* para consolidar tanto las estrategias de resolución de problemas que requieren tratamiento matemático, como las destrezas de cálculo y representación gráfica que se deben poner en juego; a medida que los alumnos demostraran un mayor dominio de estos aspectos, se introducirían las relaciones microscópicas para justificar los intercambios energéticos.

Los alumnos, dispuestos en sus grupos de trabajo, comenzaron a discutir cómo se podría calcular la variación de entalpía que se les pedía en la actividad. Parecían tener claro que las ecuaciones termoquímicas rotuladas como 1, 2 y 3 guardaban forzosamente alguna relación entre sí, pero no alcanzaban a establecer cuál. En el grupo G_A, Alfonso escribió en su guion de trabajo las ecuaciones termoquímicas correspondientes a los procesos 1 y 2, y propuso a sus compañeras aplicar la ecuación que relaciona la ΔH de una reacción con las ΔH_f de los productos y los reactivos correspondientes:

A. ¿Cómo calcularías, sin ayudarte de ninguna experiencia de laboratorio, el calor de neutralización correspondiente al proceso que se indica en la siguiente ecuación?

$NaOH_{(s)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)}$ ΔH_3

[Alfonso]: $NaOH_{(s)} \rightarrow Na^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ -16000 J/mol

$NaOH_{(aq)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)}$ -25080 J/mol

$\Delta H^\circ_r = \Sigma \Delta H^\circ_f P - \Sigma \Delta H^\circ_f R$

-41000 KJ/mol

-45'1

-76

-55'1

Sus compañeras negaron que pudiera aplicarse esta fórmula, porque aunque existe coincidencia directa entre los segundos miembros de las ecuaciones 2 y 3 (productos), no así entre los primeros miembros de las ecuaciones 1 y 3 (reactivos). El propio Alfonso pareció convencerse de este razonamiento. Ana y Adela repasaron las actividades de indagación *Fp10* y *Fp11*, y lograron relacionar por su cuenta las tres ecuaciones. Adela, a pesar de ser muy prolífica en sus manifestaciones escritas, anotó de la manera más escueta posible cómo resolver esta cuestión. También puso poca atención en la manera de expresar las variables utilizadas, porque al parecerle tan sencilla y rápida la resolución del problema, consideró que había terminado.

A. ¿Cómo calcularías, sin ayudarte de ninguna experiencia de laboratorio, el calor de neutralización correspondiente al proceso que se indica en la siguiente ecuación?

$NaOH_{(s)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)}$ ΔH_3

H_1 16 KJ/mol

ΔH_2 25 KJ/mol

ΔH_f =–41 KJ/mol

En el grupo G_B hallaron la relación entre ecuaciones termoquímicas, y la expresaron al unísono: "hay que sumarlas". Sin embargo, tardaron en rescatar de las actividades *Fp08* y *Fp09* los datos de variación de entalpía de los procesos 1 y 2, porque les costaba reconocer en sus propias manifestaciones escritas el resultado de los cálculos que ellos mismos habían hecho un par de sesiones antes.

Se transcriben a continuación las manifestaciones iniciales de Berta, que son las más adecuadas en la expresión, y las de Benito (las menos adecuadas). Obsérvese que Berta opera con todas las cifras de los valores numéricos y ofrece el resultado con cifras significativas:

A. ¿Cómo calcularías, sin ayudarte de ninguna experiencia de laboratorio, el calor de neutralización correspondiente al proceso que se indica en la siguiente ecuación?

$NaOH_{(s)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)}$ ΔH_3

[Berta (razonamientos similares: Ana, Clara)]: H_1 –19562'4 J/mol = –19'6 KJ/mol

ΔH_2 = –12'5 KJ/mol

ΔH_3 = (–19562) + (–25080) = –44642 J/mol ≈ –44'6 KJ/mol

[Benito (razonamientos similares: Darío)]: H_1 –19'6 KJ/mol

–19562'4 J/mol

ΔH_2 = –12'5 KJ/mol

–25080 J/mol

–19'6 KJ/mol + –25'08 = –44'68 KJ/mol

En el grupo G_D, Diana empezaba a demostrar indiferencia hacia el trabajo de clase. Ese día no estaba presente Débora, con la que tenía mejor relación que con Darío, y los resultados en los exámenes de evaluación la habían desanimado. Darío renunció a trabajar por los dos y se dedicó a realizar la actividad en solitario. Después de hojear las actividades de indagación *Fp10* y *Fp11*, Diana preguntó al profesor:

[Diana]: Rodrigo, ¿cómo se haría?

En G_C, Clara e Carlos revisaron los guiones de *Fp10* y *Fp11*, en busca de alguna idea. Al no encontrar ninguna, decidieron que Carlos consultaría con el grupo G_A y Clara con G_D. Carlos recogió la idea de Alfonso, y Clara la de Darío; como no lograron decidirse por ninguna, se limitaron a transcribirlas sin desarrollarlas:

A. ¿Cómo calcularías, sin ayudarte de ninguna experiencia de laboratorio, el calor de neutralización correspondiente al proceso que se indica en la siguiente ecuación?

$NaOH_{(s)} + HCl_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} + NaCl_{(aq)}$ ΔH_3

[Carlos]: $\Delta H^\circ_r = \Sigma \Delta H^\circ_f P - \Sigma \Delta H^\circ_f R$

[Clara]: $\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2 =$

Abierto el debate en gran grupo, el profesor organizó los resultados en una tabla sobre la pizarra. Los valores de ΔH obtenidos por los distintos grupos se recogen en la Tabla 3 (a continuación) antes y después de la intervención del profesor. Como para *Fp08* y *Fp09*, las expresiones recogidas en la columna **Valor de ΔH final** no se corresponden con las respuestas al apartado C, sino que están extraídos de las correcciones que los estudiantes plasmaron por escrito en sus respuestas al apartado A.

Tabla 3: expresión de los resultados de la variación de entalpía correspondiente al proceso de neutralización de una disolución de NaOH y una disolución de HCl, por transcripción de las manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp12

GRUPO	ALUMNO	VALOR DE ΔH INICIAL	VALOR DE ΔH FINAL
Ana y Adela	Ana	–76'06 KJ/mol	–76'06 KJ/mol
	Adela	–41 KJ/mol	–41 KJ/mol
Alfonso, Carlos y Clara	Alfonso	–41000 KJ/mol	*Sin respuesta*
	Carlos	*Sin respuesta*	*Sin respuesta*
	Clara	*Sin respuesta*	*Sin respuesta*
Brais, Benito y Berta	Brais	–44'6 KJ/mol	–44'6 KJ/mol
	Benito	–44'68 KJ/mol	–44'68 KJ/mol
	Berta	–44642 J/mol (~–44'6 KJ/mol)	–44642 J/mol (~–44'6 KJ/mol)
Diana, Darío y Débora	Diana	–55'2 KJ/mol	–55'2 KJ/mol
	Darío	–55'1 KJ/mol	–55'1 KJ/mol
	Débora	*No realiza la actividad*	*No realiza la actividad*

Son ocho los alumnos que aportan algún resultado de ΔH, si tenemos en cuenta a Alfonso, aunque éste no formuló explícitamente ningún cálculo ni enunció formalmente el resultado; los otros siete aplicaron adecuadamente las ideas sobre expresión de resultados que se trabajaron en las actividades anteriores (el signo de ΔH expresa el sentido de las transferencias de energía, las unidades de medida son las adecuadas y están ajustadas al rango de valores con que se trabaja, y los resultados se referencian al mol de NaOH). Sin embargo, aunque desde el punto de vista formal es adecuada la expresión de los resultados, ninguno de los alumnos tuvo en cuenta la energía absorbida por el calorímetro. En las actividades *Fp07*, *Fp08* y *Fp09* se les había insistido en que debían corregir sus resultados, y Rodrigo les ayudó a analizar la expresión matemática de la cantidad de energía absorbida por las paredes del recipiente. Después de tantas ocasiones para trabajar sobre ello y de

las manifestaciones escritas realizadas, queda claro que todos los estudiantes eran conscientes de que debían reflejar esta idea en sus cálculos, pero no lo hicieron por comodidad y actitud pasiva e indiferente hacia el aprendizaje.

Durante la puesta en común de los resultados, el profesor insistió en que la expresión de los resultados era adecuada, pero que no se podía decir lo mismo de la precisión. Animó a los alumnos a que "hicieran las cosas con atención y con planificación", y abrió otro debate en pequeño grupo para darles la oportunidad de corregir sus cálculos de acuerdo con las ideas ya discutidas.

Ante la negativa implícita de los alumnos, Rodrigo les pidió que respondieran al apartado B de la actividad, donde se les pide que extraigan conclusiones sobre los cálculos realizados. Las respuestas iniciales a esta cuestión revelan la resistencia generalizada a modificar los cálculos de actividades que ya consideraban corregidas en clase y, por tanto, acabadas: nadie hizo referencia a la poca precisión de los resultados obtenidos o a la necesidad de revisarlos, ni siquiera Ana o Adela, que parecían sentirse incómodas por tener que citar la poca precisión derivada de no incluir la corrección del calorímetro, lo que dejaría en evidencia que habían trabajado poco sus respuestas.

Las conclusiones de los cálculos realizados son similares a las ofrecidas en las actividades *Fp08* y *Fp09*, y hablan de las discrepancias entre las ΔH obtenidas en los distintos grupos, pero no de la transformación de los datos:

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer de tus cálculos?

[Alfonso]: Hai pequenas diferencias entre as ~~temper~~ entalpias de cada un dos grupos, que se debe a que cada un ten unha Δtemperatura diferente

[Carlos]: Que cada un deles ten unha pequena variación na entalpía

En lugar de ofrecer conclusiones, las manifestaciones de Brais y Darío se centraron en describir cómo habían transformado los datos:

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer de tus cálculos?

[Darío (razonamientos similares: Brais)]: O incremento de entalpía total de unha reacción é a diferencia entre a entalpía de formación dos productos ~~menos~~ e a entalpía de formación dos reactivos. Neste caso á entalpía de neutralización temoslle que sumar a entalpía de disolución do NaOH (s), porque o necesitamos en disolución acuosa para que se leve a cabo a neutralización.

La respuesta de Benito a este apartado consiste en cinco palabras que pretendían ser el inicio de un enunciado que no llegó a terminar:

B. ¿Qué conclusiones puedes extraer de tus cálculos?

[Benito]: Que a variación de entalpía

Las manifestaciones finales confirmaron los temores de Rodrigo: una actividad ya corregida en clase tiene para estos alumnos una única respuesta definitiva, y sobre ella no procede modificación alguna. Con la excepción de Benito, todos comentaron la necesidad de incluir la "corrección del calorímetro" en sus cálculos para obtener un resultado aceptable, pero no cambiaron ni una coma en los cálculos, a pesar de que la inmensa mayoría los califica como "erróneos", y Alfonso incluso puntualiza que ese "error de cálculo" es el responsable de las divergencias en los resultados de miembros del mismo grupo:

[Carlos (razonamientos similares: Ana, Brais; Adela, Diana, Clara, Darío)]: Chamoume a atención o feito de que por non ter en conta o calorímetro os meus cálculos eran erroneos

[Alfonso]: (…) aínda que ó principio a energía non era a mesma coa mesma variación nuns grupos, cambiou debido a un erro de calculo

Por su parte, Berta consideraba imposible calcular la energía absorbida por el calorímetro:

[Berta]: Que aínda que calcules toda a enerxía do sistema o calorimetro deixa escapar outra que non podemos calcular porque se perde.

Benito y Alfonso incluyeron en sus manifestaciones una reflexión sobre las unidades de medida adecuadas para expresar las variaciones de entalpía:

[Benito (razonamientos similares: Alfonso)]: Que as variacións de entalpía non se expresan en J/mol senon en KJ/mol

A la vista de las actitudes que se estaban generalizando en las últimas sesiones, Rodrigo advirtió a los alumnos que el examen estaba programado para la semana siguiente, y que en él entraban dos temas: Química Orgánica y Termoquímica. Aunque todavía quedaba bastante tiempo para terminar la sesión, les instó a terminar en casa el trabajo correspondiente a la actividad *Fp12*, y abrió el tiempo dedicado al desarrollo de la actividad *Fp13*.

Las impresiones de Rodrigo sobre el desarrollo de *Fp12* se comentan en el apartado siguiente, donde se detallan las circunstancias que influyeron en los últimos minutos de la sesión.

III.2.2.13. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp13*: dos productos de la combustión del carbón

Mediante esta actividad de aplicación (*Tabla 25*, ***Volumen A***) se pretende que los alumnos transfieran sus conocimientos al cálculo, la representación gráfica y la interpretación del significado de las variaciones de entalpía asociadas a tres

reacciones relacionadas: las combustiones completa e incompleta del carbono y la oxidación del monóxido de carbono a dióxido de carbono. Los estudiantes utilizarán las leyes de la Termoquímica y pondrán en juego estrategias relacionadas con la manipulación matemática y la representación gráfica de magnitudes.

En el planteamiento de *Fp13* se omiten deliberadamente las condiciones en las que se realizan los procesos objeto de estudio, con la finalidad de que los alumnos reflexionen sobre ellas. Se asumirá que las reacciones tienen lugar a presión constante, condiciones como las que se reproducen en un horno abierto, o en un horno cerrado con la presión controlada en torno 1 atm. En cuanto a la temperatura, aunque las combustiones suelen implicar grandes aumentos de temperatura, se suelen estudiar utilizando datos tabulados que se refieren a valores de 20 ºC ó 25 ºC.

En rigor, los alumnos no tienen por qué llegar a establecer en esta actividad los intercambios energéticos asociados a las rupturas y formaciones de enlaces químicos, pero consideramos que es útil incorporar un modelo de enlace para explicar las transferencias energéticas y para justificar la utilización de las tablas termodinámicas en el estudio de reacciones que tienen lugar en condiciones alejadas de la temperatura ambiente: dado que las interacciones entre partículas no varían de forma significativa en un amplio intervalo de temperaturas (siempre y cuando la sustancia no sufra cambios de estado o degradaciones químicas), el valor de las transferencias energéticas permanece casi constante en varios cientos de Kelvin. En este sentido, se puede considerar una aproximación aceptable utilizar los datos tabulados de ΔH_{298} para reacciones a temperaturas alejadas de la ambiente.

El diseño de *Fp13* ha tenido en cuenta que quizá los alumnos no conozcan las reacciones de formación. Por ello, en el apartado A se les invita a manejar los valores tabulados de ΔH_f para calcular las ΔH / mol O_2 correspondientes a las reacciones de combustión completa e incompleta del carbón. Se trabaja con estas reacciones de combustión porque se espera que sean familiares para los estudiantes, y porque coinciden con las reacciones de formación de los óxidos de carbono a partir de sus elementos, así que ayudan a ver cómo las ΔH_f tabuladas permiten conocer directamente valores de entalpía de las sustancias químicas cuya formación se analiza.

El cálculo que se propone en el apartado A es trivial; lo esencial es hacer explícita la relación entre las tres reacciones descritas. También se pondrá de manifiesto el carácter extensivo de la entalpía al pedir a los alumnos que calculen la variación de entalpía para cada mol de oxígeno.

A continuación, mediante el apartado B, se aplicarán las leyes de la Termoquímica para determinar, a partir de los valores de ΔH_c obtenidos, la variación de entalpía correspondiente la reacción de oxidación del CO a CO_2.

Conocidas las ΔH de las tres combustiones, los valores se relacionarán gráficamente mediante un diagrama entálpico. En la elaboración del diagrama, los estudiantes pondrán en juego las estrategias y destrezas relacionadas con la representación gráfica que ya trabajaron en la actividad *Fp05*. Además, el diagrama servirá para apoyar la construcción de una interpretación termoquímica de las tres reacciones químicas, con o sin la utilización de los modelos de enlace químico.

Si los alumnos conocen los aspectos básicos del enlace y la estructura de carbono (en cualquiera de sus variedades alotrópicas), del oxígeno, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, puede aprovecharse *Fp13* para elaborar una justificación teórica a las transferencias energéticas de los tres procesos, utilizando los modelos de enlace y reacción química. Queda a juicio del profesor la decisión de integrar los modelos macroscópicos y microscópicos hasta el punto en que los conocimientos del alumnado y la temporalización de las sesiones lo permitan.

Como se ha comentado en el apartado correspondiente a la implementación de *Fp12* (*Aplicación y desarrollo de la a Fp12: ... y sin necesidad de recurrir al laboratorio*, pág. 662), Rodrigo prefirió dedicar *Fp12* y *Fp13* a superar las dificultades de aprendizaje relacionadas con las destrezas y estrategias de tratamiento y representación de datos para resolver problemas científicos. El desarrollo de los modelos de enlace y reacción se pospondría hasta *Fp14* salvo que los propios estudiantes introdujeran en *Fp13* relaciones del dominio microscópico.

Al comienzo de la actividad, los alumnos debatieron en sus grupos de trabajo la respuesta a las dos primeras cuestiones de la actividad. Recuérdese que el final del desarrollo de *Fp12* fue conflictivo por la negativa de los estudiantes a corregir sus cálculos; sin embargo, en cuanto cambiaron de página, leyeron el guion de trabajo de *Fp13* y se pusieron a trabajar sin quejarse o dar muestras de disgusto.

La primera de las cuestiones, la determinación de la variación de entalpía por mol de oxígeno para las reacciones de combustión del carbón partiendo de las ΔH_f correspondientes, no ofreció dificultades. Los alumnos consultaron las tablas de datos termodinámicos y encontraron rápidamente la relación entre las ΔH_c de los dos procesos objeto de estudio y los datos de ΔH_f asociados a los productos CO y CO_2. Sin embargo, todos referenciaron el resultado a un mol de carbono.

En cuanto a la expresión de los resultados, incluyeron los datos de ΔH_c en la ecuación química para generar una ecuación termoquímica. Sin embargo, solamente Adela y Clara utilizaron la simbología científica para los datos numéricos de ΔH:

A. A partir de los datos de ΔH_f para el CO y el CO_2, calcula la ΔH_c por mol de oxígeno para las reacciones de combustión del carbón, descritas por las siguientes ecuaciones:

[Adela (razonamientos similares: Clara)]:

$C_{(s)} + \frac{1}{2} O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{(g)}$ $\quad \Delta H = -110'5$ KJ/mol

$C_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)}$ $\quad \Delta H = -393'5$ KJ/mol

Las expresiones de otros cinco alumnos se acercan bastante a las científicamente aceptables: el signo negativo indica la exotermia de reacción, y utilizan unidades adecuadas (kJ/mol); pero los datos no se declaran como valores de ΔH, sino como resultados numéricos de las ecuaciones químicas:

A. A partir de los datos de ΔH_f para el CO y el CO_2, calcula la ΔH_c por mol de oxígeno para las reacciones de combustión del carbón, descritas por las siguientes ecuaciones:

[Ana (razonamientos similares: Alfonso, Benito, Carlos, Diana]:

$C_{(s)} + ½\ O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{(g)}$ = -110'5 KJ/mol

$C_{(s)} + O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{2\ (g)}$ = -393'5 KJ/mol

Las expresiones de Brais, Berta y Darío se alejan más de las aceptables, por no incluir las unidades de medida, ni declarar los datos como valores de ΔH (a excepción de Darío, que rotula los datos como correspondientes a variaciones de entalpía de formación). Berta, omite las unidades de medida y el signo:

A. A partir de los datos de ΔH_f para el CO y el CO_2, calcula la ΔH_c por mol de oxígeno para las reacciones de combustión del carbón, descritas por las siguientes ecuaciones:

[Darío]:

$C_{(s)} + ½\ O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{(g)}$ $\Delta H_f \rightarrow$ -110'5

$C_{(s)} + O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{2\ (g)}$ $\Delta H_f \rightarrow$ -393'5

[Brais]:

$C_{(s)} + ½\ O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{(g)}$ = -110'5

$C_{(s)} + O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{2\ (g)}$ = -393'5

[Berta]:

$C_{(s)} + ½\ O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{(g)}$ = 110'5

$C_{(s)} + O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{2\ (g)}$ = 393'5

Inmediatamente, los estudiantes pasaron a responder la segunda cuestión que se les planteaba: calcular la variación de entalpía de la oxidación del CO a CO_2. Tuvieron bastantes dificultades para relacionar esta oxidación con las combustiones completa e incompleta del carbono. Algunos conceptualizaron la oxidación de CO a CO_2 como una combustión completa del carbón que consta de dos etapas, los dos procesos anteriores. En sus manifestaciones iniciales, Darío reformula la reacción de "combustión total" con una nueva ecuación química que se calcula como el doble de la suma de las dos ecuaciones químicas de "combustión parcial".

B. ¿Cuál es la variación de entalpía correspondiente a la reacción representada por la siguiente ecuación?

[Darío]: $4\ C_{(s)} + 3\ O_{2\ (g)} \rightarrow 2\ CO_{(g)} + 2\ CO_{2\ (g)}$

$\Delta H = \Sigma H_{PROD} - \Sigma H_{REACT}$

$\Delta H_c = -221 + (-787) - 0 = -1008$ KJ para 3 moles O2

-1008 KJ / 3 moles = -336 KJ/mol de O_2

Solamente las manifestaciones de Benito, aun incompletas, parecen apuntar

en la dirección adecuada:

B. ¿Cuál es la variación de entalpía correspondiente a la reacción representada por la siguiente ecuación?

[Benito]: $CO \rightarrow \cancel{C} + \frac{1}{2} \cancel{O_2}$

$\cancel{C} + \cancel{O_2} \rightarrow CO_2$

$\frac{1}{2} O_2$

Los demás no se aventuraron a tomar nota por escrito de esta idea, pero en el seno de los grupos se debatió intensamente cómo relacionar las combustiones total y parcial del carbón con la combustión de CO a CO_2; la discusión se extendió a todos los grupos a raíz de la idea de Darío, que Ana y Adela rechazaban:

[Darío]: La suma de las dos reacciones.

[Adela]: Pero dándole la vuelta a ésa (la combustión del carbón a CO).

Llegado a este punto, Ana decidió consultar con el profesor:

[Ana]: Rodrigo, esto es productos menos reactivos... Pero ¿esta ecuación no sería al revés?

Mientras el profesor ayudaba a Ana a relacionar las ecuaciones, los demás escuchaban el diálogo y se convencieron de los argumentos de la ciencia escolar. Las manifestaciones escritas que produjeron reflejan directamente que la combustión del CO a CO_2 es un proceso cuya variación de entalpía responde a la diferencia de las correspondientes variaciones de entalpía de formación de productos y reactivos. Se aporta como ejemplo la transcripción de las manifestaciones de Alfonso, las más completas de las registradas, puesto que incluyen las tres ecuaciones termoquímicas de tal manera que se observa la relación entre reactivos y productos:

B. ¿Cuál es la variación de entalpía correspondiente a la reacción representada por la siguiente ecuación?

[Alfonso]: $\Delta H°_r = \Delta H_{(p)} - \Delta H_{(r)} = -393'5 - (-110'5) = -283$ KJ/mol

$$\left.\begin{array}{l} C_{(g)} + \frac{1}{2} O_{2\,(g)} \rightarrow C_{(g)} \\ C_{(g)} \rightarrow C_{(s)} + \frac{1}{2} O_{2\,(g)} \\ C_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)} \end{array}\right\} \begin{array}{l} -110'5 \\ -393'5 \end{array}$$

Rodrigo vio que el diálogo prosperaba, y el debate en pequeño grupo dio paso a una puesta en común en grupo de clase. Animado, preguntó a los alumnos qué fórmula aplicarían para plasmar estas ideas, y si se podría aplicar alguna otra relación matemática diferente. La respuesta inmediata de Adela fue la que sigue:

[Adela]: ¿Calcular el calor y dividirlo entre los moles?

[Profesor]: ¿De qué proceso?

[Adela]: Del ce-o-dos, ¿no?

Inmediatamente indicó que se refería a aplicar la ley de Hess a los tres procesos, como dejaría apuntado en sus manifestaciones escritas:

B. ¿Cuál es la variación de entalpía correspondiente a la reacción representada por la siguiente ecuación?

[Adela]: (...) Otra opción seria por la ley de Hess

Todos parecieron aceptar sin problemas la equivalencia entre las dos vías de cálculo, aunque solamente Adela hizo explícita esta relación en sus anotaciones.

Aprovechando esta idea, Rodrigo les propuso comparar las variaciones de entalpía de los tres procesos representándolos en un mismo diagrama. Se dio comienzo a un nuevo debate en pequeño grupo para que elaboraran sus gráficas.

Pocos minutos después, el desarrollo de la actividad se vería alterado por una cadena de circunstancias que condicionarían el desarrollo de las sesiones siguientes: desde el pasillo llegó la algarabía de los alumnos de otras clases, que preparaban el festival de Carnaval. De común acuerdo, se decidió que la actividad *Fp13* se terminaría en la sesión siguiente, que se celebraría el siguiente martes por la tarde. Rodrigo advirtió que entre la clase del martes y el examen tradicional, previsto para el jueves, solamente quedaba una sesión, la del miércoles. Los alumnos respondieron que ese miércoles estaba fijada la convocatoria de una huelga estudiantil en contra del plan Bolonia.

Terminada la sesión, el profesor se reunió con la investigadora y le ofreció sus impresiones sobre el desarrollo de aquella accidentada sesión:

En primer lugar, consideraba que el trabajo en el aula había sido fructífero en el sentido de que los alumnos ya llegaban a establecer por sí mismos algunas relaciones matemáticas entre magnitudes de distintos procesos cuyas relaciones conceptuales no identificaban al principio. Sin embargo, le preocupaban la tirantez en la dinámica interna de G_B y el creciente desinterés de Carlos y Diana

Su inquietud más inmediata estaba en el desarrollo de las dos sesiones previas al examen tradicional del jueves, después del cual se pretendía realizar la caracterización inicial de la muestra. Era de prever que la asistencia a la clase del miércoles se vería afectada por la huelga, porque las huelgas anteriores contra el plan Bolonia habían tenido una alta participación; y en la sesión del martes por la tarde había que terminar la actividad *Fp13* y desarrollar suficientemente *Fp14*, de manera que del martes al miércoles los alumnos pudieran buscar información sobre los combustibles de *Fp14* para poder llegar a una conclusión "con datos en la mano". *Fp15* quedaba para el miércoles, día anterior al examen. Rodrigo tenía serias dudas de que la actividad *Fp13* pudiera llevarse a término con un desempeño aceptable, porque las sesiones de los martes por la tarde presentaban un rendimiento apreciablemente inferior al de otros días de la semana.

En efecto, el rendimiento medio de los alumnos en sus respuestas a las cuestiones de los apartados B y C de *Fp13* es sustancialmente inferior al demostrado en las demás actividades de la fase previa:

El apartado B pedía a los alumnos que elaboraran un diagrama entálpico donde representaran las tres reacciones de combustión propuestas y, basándose en el diagrama, analizaran las transferencias energéticas involucradas. Cinco alumnos (Ana, Alfonso, Adela, Clara y Darío) de los diez presentes elaboraron el diagrama entálpico, pero ninguno explicó por escrito los aspectos energéticos de las tres reacciones. El martes por la tarde, la participación en el trabajo en pequeño grupo fue apática, y Rodrigo se vio obligado a pasar a la puesta en común en grupo de clase, porque consideraba que si no se "tiraba del hilo", el desarrollo de *Fp14* se echaría a perder.

Las representaciones gráficas realizadas por los alumnos presentan el perfil discontinuo propio de los diagramas entálpicos. Este rasgo indica que incorporaron la idea de que la Termodinámica (Clásica) no permite analizar estados intermedios de los sistemas. La identificación de las variables dependiente e independiente tampoco pareció ofrecer dificultades; sin embargo, las representaciones de Alfonso y Adela no tienen rótulos de las magnitudes representadas, mientras que Darío, Clara y Ana solamente rotularon la variable dependiente. Ana, Alfonso y Adela dudaban al principio si la variable a representar era la entalpía o la variación de entalpía, hasta que Rodrigo les ayudó.

En todos los diagramas salvo el de Alfonso, la escala de entalpía es relativa: no se establece un valor referencial, sino que para los tres procesos se representan los valores de cada estado inicial y final separados entre sí una distancia vertical que se acota con una flecha de unión que aparece rotulada como la variación de entalpía del sistema. Alfonso, por su parte, solamente representó un estado inicial del sistema compuesto por carbono y oxígeno gaseoso, pero no estableció ningún estado final.

De los cinco que elaboran el diagrama entálpico, son tres los que cumplen con el objetivo de la actividad, que es analizar los tres procesos de combustión en términos de las transferencias energéticas netas entre el sistema el entorno:

Clara representa uno de los procesos, aunque no indica cuál, porque rotula los estados inicial y final como "reactivos" y "productos", respectivamente. Su diagrama contiene una idea alternativa que comparte con Adela, y que tiene que ver con problemas de conceptualización de la recta real. Para Clara, si dos números reales negativos a y b verifican $|a| > |b|$, entonces $a > b$ y, por tanto, en una gráfica o diagrama, el a debe situarse en un nivel superior que b. en consecuencia, Clara representa en su escala de entalpías los "productos" con un nivel de entalpía superior a los "reactivos":

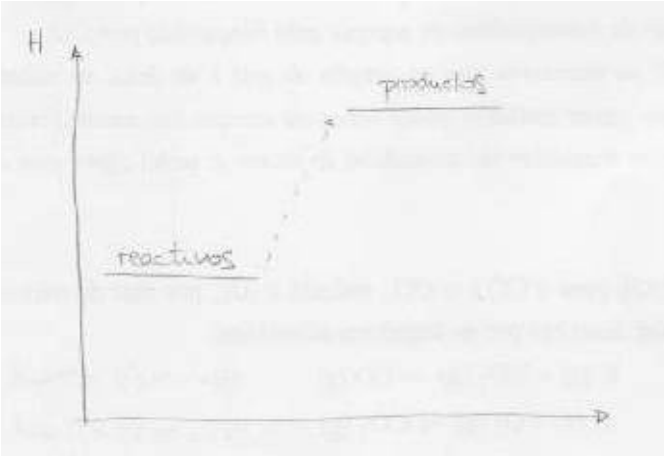


Figura 4: gráfica extraída de las manifestaciones escritas de Clara a la actividad Fp13

Esta idea alternativa reaparecería durante el desarrollo de *Fp14*, en las manifestaciones orales de Adela (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp14: la "entalpía de enlace"*, pág. 678).

Los diagramas de los tres alumnos restantes (Ana, Adela y Darío) incorporan adecuadamente el significado del valor negativo de las variaciones de entalpía asociados a los procesos representados: el estado correspondiente a carbono y oxígeno gaseoso se asocia a un valor de entalpía superior al estado representado por CO, y éste a su vez está situado por encima del estado representado por el dióxido de carbono. La estrategia que siguieron Ana y Adela para construir su diagrama se basó en un boceto anotado por Ana durante el debate en pequeño grupo, mientras discutía con Adela qué escala relativa de entalpías era conveniente. En este boceto, Ana estructuró en escalones descendentes los estados del sistema correspondientes a las composiciones químicas siguientes: carbono y oxígeno (estado 1), monóxido de carbono (estado 2) y dióxido de carbono (estado 3). Sin embargo, a la hora de trasladar estas ideas a la versión definitiva del diagrama, tanto Ana como Adela transcribieron incorrectamente la composición del estado 1 del sistema, que rotularon igual que la del estado 3: CO_2, en lugar de $C+O_2$. Teniendo en cuenta el grado de elaboración del razonamiento que las dos demostraron en la construcción del boceto, entendemos que este rótulo inadecuado se debe a una errata en la transcripción del diagrama:

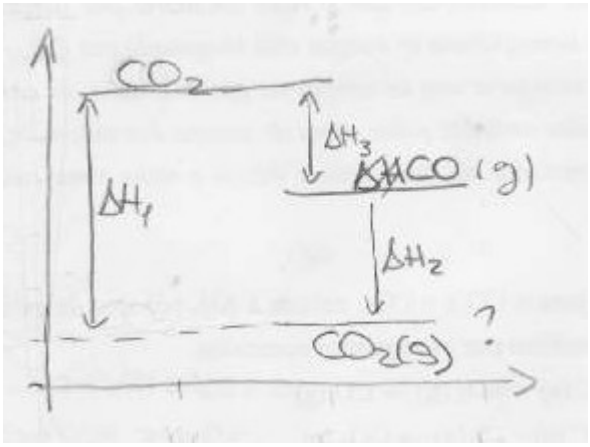


Figura 5: gráfica extraída de las manifestaciones escritas de Ana a la actividad Fp13

Se transcribe a continuación el diagrama entálpico construido por Darío:

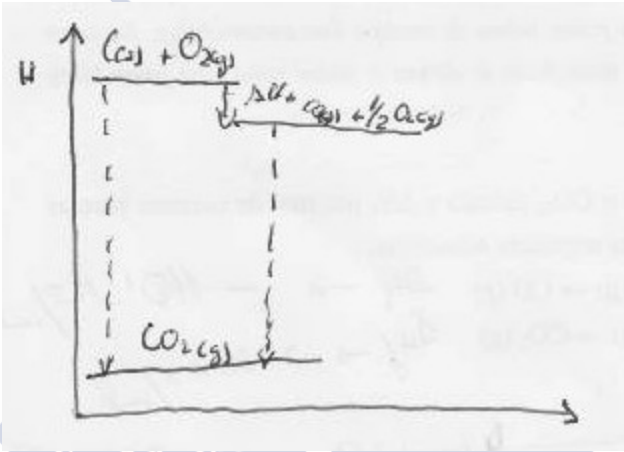


Figura 6: gráfica extraída de las manifestaciones escritas de Darío a la actividad Fp13

En lo que se refiere a la direccionalidad de las flechas con las que se rotulan los valores de ΔH, solamente Clara y Darío utilizan flechas de un sentido cuya direccionalidad indica la trayectoria del cambio químico. Las flechas de los diagramas de Ana y Adela tiene doble sentido e indican la extensión del valor de ΔH. Idéntico significado parece tener la única flecha que, en el incompleto diagrama de Alfonso, une el estado inicial del sistema con el eje de abscisas (valor cero).

Terminada la puesta en común, Rodrigo encargó a los alumnos que no habían realizado la tarea que terminaran sus diagramas en casa, así como el apartado D, porque quedaba poco tiempo para el examen tradicional y el resto de la sesión debía dedicarse a *Fp14*, para que la clase del día siguiente se pudiera dedicar a terminar *Fp14* y a desarrollar *Fp15*. También les insistió en que cualquier duda sobre los temas de examen, ya se tratase de Termoquímica o de Química Orgánica, podía discutirse en cualquier sesión, como habitualmente se hacía.

La respuesta de los diez alumnos al apartado D de la actividad muestra por sí misma el trabajo que los alumnos dedicaron en sus casas a completar *Fp13*:

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Ana, Alfonso, Brais, Benito, Carlos, Berta, Adela, Diana, Clara, Darío]: (Sin respuesta.)

III.2.2.14. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp14*: la "entalpía de enlace"

En (*Tabla 26*, ***Volumen A***) se representa la actividad *Fp14*, transcrita del original que se facilitó a los alumnos. Con esta actividad se pretende que los alumnos apliquen sus conocimientos de Termoquímica para analizar las combustiones de cuatro hidrocarburos que han tenido una importancia histórica como combustibles domésticos e industriales.

El diseño de *Fp14* pasa por el cálculo de la ΔH_c de los cuatro hidrocarburos (etano, etileno, acetileno y benceno) a partir de los correspondientes valores tabulados de ΔH_f. Después de esta tarea, en cuya resolución los estudiantes tendrán que aplicar las leyes de la Termoquímica, se plantea una cuestión abierta con la que deberán interpretar datos de diversas fuentes, entre ellos los resultados numéricos obtenidos en la primera tarea. El problema planteado consiste en elegir cuál de los cuatro hidrocarburos objeto de estudio es el mejor combustible. El enunciado de *Fp14* no dirige la atención de los alumnos hacia ningún ámbito de aplicación concreto, porque se pretende que hagan explícitas las características químicas que determinan la idoneidad de los combustibles, sin añadir otro tipo de condicionantes.

Para elegir el mejor de los cuatro combustibles, los alumnos se basarán en criterios relacionados con diferentes ámbitos de conocimiento: la cantidad de energía liberada en la reacción de combustión, el rendimiento energético del proceso, la abundancia natural de los recursos energéticos y su disponibilidad en el entorno, las posibilidades tecnológicas de explotación, la inversión en tiempo y dinero que se requiere para producir y distribuir los combustibles, el impacto que tendría su explotación industrial sobre el medioambiente y sobre las sociedades humanas en cuanto a aspectos como la contaminación, las dificultades en la gestión de los residuos, la peligrosidad en su utilización a gran escala o el riesgo de accidentes. Hemos seleccionado un problema que incluye todos estos aspectos, por dos motivos: en primer lugar, porque sin analizar estos factores socioeconómicos es imposible adoptar decisiones responsables sobre la utilización de combustibles en la vida cotidiana; en segundo lugar, las conclusiones que se extraen del análisis de estos factores se pueden utilizar para reconducir el análisis termoquímico hacia la introducción de los modelos microscópicos de enlace y estructura de la materia, ya sea partiendo de la cuantía de los intercambios energéticos (el *poder calorífico* de los combustibles), o de las propiedades fisicoquímicas que determinan su peligrosidad

y su facilidad de manipulación y almacenamiento (densidad, inflamabilidad, volatilidad, inercia a reacciones de degradación química, biológica, fotoinducida…) El objetivo es que los alumnos acepten que la eficiencia termoquímica de un proceso no debe ser el único criterio de decisión cuando se trata de implementar un proceso químico a nivel industrial o de generalizar su utilización a nivel doméstico.

Con la puesta en común de todas estas ideas, se puede introducir en el aula un debate en gran grupo para tratar las ventajas y los inconvenientes de los combustibles fósiles como recursos energéticos. Se hará explícita la necesidad de conseguir y mantener la sostenibilidad energética, al poner de manifiesto la necesidad de utilizar racionalmente los recursos disponibles, la urgencia de acelerar la implementación de recursos energéticos alternativos a los actuales y la necesidad de gestionar la explotación de los recursos de manera responsable, justa y solidaria.

Fp14 termina con la elaboración de un razonamiento justificativo sobre la exotermia de las cuatro reacciones de combustión. La complejidad de los razonamientos viene dada por los conocimientos iniciales de los alumnos sobre el dominio microscópico de la materia. Siguiendo razonamientos explicativos poco profundos, los aspectos energéticos de estos procesos se interpretarían atendiendo al signo de la variación de entalpía de las reacciones de formación de las sustancias químicas implicadas, y se relacionarían con los procesos de transferencia de energía calor y trabajo. En un nivel de interpretación justificativo, más profundo, se recurriría a los modelos de enlace químico y reacción química para analizar las ΔH_c desde el punto de vista de los cambios que se producen en las interacciones entre las partículas del sistema. Así se complementaría la perspectiva macroscópica de la Termodinámica Clásica con una visión microscópica, que dota de un mayor poder descriptivo e interpretativo a los esquemas de razonamiento del alumnado, y que favorece la integración de los dominios de representación del conocimiento de la Química para dar respuesta a cuestiones científicamente relevantes. La sencilla estructura química de estos cuatro compuestos hará más fácil que los estudiantes puedan reconstruir la perspectiva microscópica de las reacciones de combustión.

La actividad de aplicación *Fp14* se puede aprovechar para introducir, a partir de los modelos de enlace y reacción química, la variación de entalpía de enlace promedio, ΔH_{enlace}, parámetro estimador de la fortaleza de un enlace químico. ΔH_{enlace} se definirá como la cantidad de energía necesaria para romper un determinado enlace, y se asociarán a ella varias ideas ya conocidas sobre la variación de entalpía:

Su signo es necesariamente positivo. Los enlaces más estables (por ejemplo, enlaces covalentes de mayor orden) tienen un mayor valor de ΔH_{enlace} que los menos estables. Por ser la entalpía una función de estado, ΔH_{enlace} se puede utilizar para estimar la variación de entalpía de cualquier reacción química, puesto que la cantidad de energía transferida durante una reacción depende de las interacciones que se rompan y establezcan. En cuanto a la terminología recomendada, se evitará

hablar de "entalpía de enlace" para referirse a ΔH_{enlace}, y se introducirán como expresiones adecuadas "variación de entalpía de enlace" o "energía de enlace".

El objetivo de *Fp14* es que los alumnos lleguen a establecer un razonamiento justificativo que relacione los aspectos energéticos de las reacciones con la estabilidad de los enlaces disociados y formados durante las mismas. Estos objetivos son directrices, así que en todo caso son flexibles y están supeditados a los conocimientos del alumnado y a la temporalización.

Durante la implementación de *Fp14* en el aula, el docente tuvo que esforzarse en ayudar a los estudiantes a organizar y sistematizar las descripciones e interpretaciones que se iban hilvanando a partir de las ideas surgidas en los debates en pequeño grupo y, antes de comenzar la puesta en común del apartado C, tuvo que cerciorarse de que todos los grupos hubieran introducido en sus respuestas alguna idea sobre los modelos de enlace y reacción química.

Las primeras dificultades relacionadas con los modelos microscópicos surgieron al principio de la actividad, cuando los alumnos intentaron establecer las ecuaciones químicas correspondientes a las reacciones de combustión planteadas. Por ejemplo, Adela consideraba que la reacción de combustión del etano es:

[Adela]: Etano más ce-o-dos más agua (...)

No era capaz de deducir los productos de la combustión, porque:

[Adela]: (...) porque no sabía descomponer eso.

Alfonso le aconsejó que copiara las reacciones que figuran en las tablas termoquímicas de formación. Entonces, Adela consultó el libro de texto y contraargumentó que las reacciones de formación y de combustión no son lo mismo:

[Adela]: Claro, que no miré esta tabla, la tabla del libro… Donde vienen los compuestos todos juntos. –A ver, no… no me estás entendiendo. El etano sería un producto, no un reactivo.

Ana identificó adecuadamente los reactivos y productos de las combustiones, pero pidió ayuda al docente para calcular el "número de hidrógenos y oxígenos" con el que ajustar la estequiometría de la ecuación.

La formulación de los hidrocarburos también creó problemas en los distintos grupos, lo que alarmó a Rodrigo y le hizo detener el debate en pequeño grupo para llamar la atención a los alumnos sobre el hecho de que se presentaran tales dudas dos días antes del examen tradicional sobre Química Orgánica. Además, en el enunciado de la actividad se ofrece el nombre IUPAC de los cuatro hidrocarburos y su fórmula molecular, detalle en el que los estudiantes parecían no haber reparado. La idea que detuvo el debate fue la afirmación de Benito sobre una hipotética fórmula "CH_6" para el etano:

[Profesor]: ¿CH_6? ¡Te cojo de una oreja, oye! ¡Cogotazo! ¿Cómo pode ser isto?

Establecidas las ecuaciones químicas de las combustiones, los alumnos utilizaron las tablas de datos termoquímicos para relacionar las transferencias energéticas de estos procesos con las de las reacciones de formación de los compuestos implicados. Establecieron adecuadamente las relaciones entre unos procesos y otros, aunque Darío o Adela mostraron cierta indecisión a la hora de analizar si estas combustiones generarían agua en estado líquido o gaseoso:

[Adela]: ¿Y el agua, que sería, líquida?

Rodrigo introdujo entonces la idea de que, dependiendo de las condiciones de temperatura y presión en las que se realizara la combustión, el agua se encontraría en un estado de agregación u otro, y animó a los estudiantes a indicar las condiciones en las que creyeran que tenían lugar estas reacciones. A pesar de las indicaciones del profesor, ninguno estableció explícitamente las condiciones. De los diez alumnos que estuvieron presentes en la sesión, solamente Berta y Darío consideraron que el agua se generaría en estado gaseoso, y cinco (Alfonso, Benito, Adela, Diana y Clara) sostuvieron que el agua se presentaría en estado líquido. De las manifestaciones de Brais e Carlos no se puede deducir qué opinaban al respecto, porque sus ecuaciones químicas no indican los estados de las sustancias; tampoco realizaron cálculos en los que se utilizaran los datos de ΔH_f de un estado de agregación concreto. El único que reflejó por escrito el estado de agregación de las sustancias fue Alfonso, aunque sólo manifestó esta idea en una de las cuatro ecuaciones y no indicó el estado del etano, posiblemente por desconocerlo, a pesar de que las tablas termodinámicas del libro de texto ofrecían esta información:

A. A partir de las tablas de ΔH_f, calcula ΔH_c de los siguientes compuestos:

Etano: C_2H_6

[Alfonso]: $C_2H_6 + 7/2\ O_{2\ (g)} \rightarrow 2\ CO_{2\ (g)} + 3\ H_2O_{\ (l)}$

(…)

Eteno (etileno): C_2H_4

$C_2H_4 + 3\ O_2 \rightarrow 2\ CO_2 + 2\ H_2O$

(…)

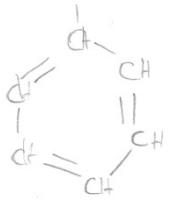
Etino (acetileno): C_2H_2

~~$2(H-C) + 1(C-C) = 1441$~~

$C_2H_2 + 3/2\ O_2 \rightarrow 2\ CO_2 + H_2O$

(…)

Benceno: C_6H_6



~~6(H-C) + 6(C-C) = 6156~~

$C_2H_2 + 15/2\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 3\ H_2O$

(…)

Las manifestaciones iniciales de Ana tampoco permiten deducir qué estado de agregación suponía para el agua, y cuando Rodrigo le preguntó por ello, alegó que no se había basado en las tablas de datos de ΔH_f, sino en la tabla de ΔH_{enlace}. Expresado con sus propias palabras:

[Ana]: Yo lo hice con los enlaces.

En sus manifestaciones finales, Ana rehizo sus cálculos de ΔH_c utilizando los datos de ΔH_f, y consideró que el agua se presentaba en estado líquido. Indicó en todas las ecuaciones químicas los estados de agregación de reactivos y productos, y la única idea alternativa que mantuvo fue que el benceno se presentaba en estado gaseoso, a pesar de que previamente había declarado que este hidrocarburo "é máis denso e máis líquido" que los otros tres.

Ana y Alfonso fueron los únicos que utilizaron en sus manifestaciones iniciales del apartado A alguna idea relacionada con los modelos de estructura de la materia; los demás obviaron la estructura molecular de los compuestos estudiados.

Abierto el tiempo de puesta en común, se analizaron los resultados de ΔH_c de los cuatro hidrocarburos. Los resultados obtenidos se recogen en la *Tabla 4*, donde se transcriben los valores y unidades utilizados por los alumnos antes y después de la intervención. Las expresiones de la columna **Valor de ΔH_c final** se corresponden en un solo caso (el de Ana) con las respuestas al apartado C de la actividad; los demás "Valores de ΔH_c final" están extraídos de las correcciones que los estudiantes plasmaron por escrito en sus respuestas al apartado A.

De los diez alumnos que realizaron la actividad, seis presentaron resultados para las cuatro reacciones de combustión. Carlos, que llegó tarde a clase, se negó a colaborar con Clara, y en el grupo G_B el desempeño fue bajo: Benito solamente calculó la ΔH_c de dos reacciones, y Brais y Berta se limitaron a obtener el del etano y dejaron de trabajar.

Tabla 4: expresión de los resultados de la variación de entalpía correspondiente a los procesos de combustión de etano, etileno, acetileno y benceno, por transcripción directa de las respuestas al apartado A (C, en el caso de Ana) de la actividad Fp14

ALUMNO	VALOR DE ΔH_c INICIAL				VALOR DE ΔH_c FINAL			
	$\Delta H_c[C_2H_6]$	$\Delta H_c[C_2H_4]$	$\Delta H_c[C_2H_2]$	$\Delta H_c[C_6H_6]$	$\Delta H_c[C_2H_6]$	$\Delta H_c[C_2H_4]$	$\Delta H_c[C_2H_2]$	$\Delta H_c[C_6H_6]$
Ana	–2837 KJ/mol	–2355 KJ/mol	–1660 KJ/mol	–5364 KJ/mol	–1559'7 KJ/mol –51'99 KJ/g	–1410'9 KJ/mol –50'39 KJ/g	–1299'5 KJ/mol –49'4 KJ/g	–3267'4 KJ/mol –41'8 KJ/g
Alfonso	–1559'7 KJ/mol	–1410'9 KJ/mol	–1299 KJ/mol	–3267 KJ/mol	–1559'7 KJ/mol	–1410'9 KJ/mol	–1299 KJ/mol	–3267 KJ/mol
Adela	–1559'7 KJ/mol	–1410'9 KJ/mol	–1299'5 KJ/mol	–3267'4 KJ/mol	51'9 KJ/g	50'39 KJ/g	49'98 KJ/g	41'8 KJ/g
Carlos	*Sin respuesta*				*Sin respuesta*			
Clara	–1559'7 KJ/mol	–1410'9 KJ/mol	–1299'5 KJ/mol	–3267'4 KJ/mol	51'9 KJ/g	50'39 KJ/g	49'98 KJ/g	41'8 KJ/g
Brais	5	*Sin respuesta*			5	*Sin respuesta*		
Benito	–1559'7 KJ	–1410'5 KJ/mol	*Sin respuesta*		–1559'7 KJ	–1410'5 KJ/mol	*Sin respuesta*	
Berta	1427'7 Kj/mol	*Sin respuesta*			1427'7 Kj/mol	*Sin respuesta*		
Diana	–1559'7 KJ/mol	1410'9 KJ/mol	–1299'5 KJ/mol	–3267'4 KJ/mol	51'9 KJ/g	50'39 KJ/g	49'98 KJ/g	41'8 KJ/g
Darío	–1427'7 KJ/mol	–1224'5 KJ/mol	–1156'1 KJ/mol	–3267'4 KJ/mol	51'9 KJ/g	50'39 KJ/g	44'48 KJ/g	41'8 KJ/g
Débora	*No realiza la actividad*				*No realiza la actividad*			

Revisando el registro videográfico de la sesión y las entrevistas realizadas a los docentes del centro, parece que la única pretensión de Berta y Brais era comprobar que podían hallar por sí mismos la "respuesta correcta" a un ejercicio numérico, para asegurarse de que en el examen podrían reproducir al pie de la letra el algoritmo "correcto". Brais, más seguro de su dominio del cálculo, ni siquiera se esforzó en ajustar las ecuaciones químicas, y redujo todos sus esfuerzos a identificar la relación matemática que tenía que aplicar para obtener un resultado. La fórmula que anotó como única respuesta a la cuestión parece indicar que consideraba las ΔH_f como entalpías correspondientes a los compuestos; la diferencia entre las ΔH_f de los productos y de los reactivos proporciona la variación de entalpía de la combustión:

A. A partir de las tablas de ΔH_f, calcula ΔH_c de los siguientes compuestos:

Etano: C_2H_6

[Brais]: $C_2H_6 + 3/2\ O_{2\ (g)} \rightarrow 2\ CO_{2\ (g)} + 3\ H_2O_{(l)}$

$\Delta H_c/mol = \Sigma H_{PROD} - \Sigma H_{REACT} = 5$

Eteno (etileno): C_2H_4

$C_2H_4 + 3\ O_2 \rightarrow 2\ CO_2 + 2\ H_2O$

$\Delta H_c/mol = \Sigma H_{PROD} - \Sigma H_{REACT} =$

Etino (acetileno): C_2H_2

$C_2H_2 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$

ΔH

Benceno: C_6H_6

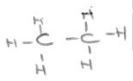
$C_2H_2 + 15/2\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 3\ H_2O$

Hasta aquel momento, Benito se había mostrado activo y colaborador en G_B, e interpretamos que su bajo rendimiento en este apartado A se debió a la mala disposición de sus compañeros hacia el trabajo de aula. En el seno de este grupo había desacuerdos, y Benito pareció cansarse de que sus compañeros se limitaran a copiar sus respuestas mientras él se esforzaba en resolver las cuestiones. Decidió realizar cuidadosamente los cálculos de las dos primeras reacciones, y después desentenderse del resto para no beneficiar con su esfuerzo a dos compañeros que estaban dispuestos a aportar poco al trabajo de grupo.

De los diez alumnos presentes, siete aplicaron adecuadamente las leyes de la Termoquímica y obtuvieron resultados matemáticamente correctos (Berta y Darío utilizaron el valor de $\Delta H_f[H_2O_{(g)}]$, y los demás, $\Delta H_f[H_2O_{(g)}]$). Brais e Carlos no llegaron a resultados, y también Ana, que en sus cálculos basados en las variaciones de entalpía de enlace, consideró que las transferencias energéticas se limitaban a las rupturas de los enlaces de los hidrocarburos. Para ilustrar esta idea alternativa se transcriben parte las manifestaciones escritas de Ana al apartado A:

A. A partir de las tablas de ΔH_f, calcula ΔH_c de los siguientes compuestos:

Etano: C_2H_6



$\Delta H^\circ_c = 6\Delta H(H\text{–}C) + \Delta H(C\text{–}C) = 6 \cdot 415 + 34 = -2837$ KJ/mol (…)

Inicialmente, Alfonso había desarrollado sus cálculos partiendo de la misma idea, pero obtuvo un resultado positivo para ΔH_c, y reconoció que era incoherente con su predicción sobre el sentido de las transferencias energéticas entre el sistema y el entorno. En consecuencia, cambió de estrategia, como él mismo explicaría:

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

Para facer ben o exercicio tiven que volvelo facer porque eu calculei os datos polos enerxía dos enlaces, e ademais de que me daban o resultado positivo, cambiaba bastantante. (…)

La expresión de los resultados numéricos es adecuada en todos los casos

salvo en el de Berta, que no indicó el sentido de las transferencias de energía mediante el signo de ΔH_c. Los ocho que aportaron algún resultado utilizaron las unidades de medida recomendables, y referenciaron las ΔH_c al mol de hidrocarburo. Todos los datos numéricos que utilizaron proceden de la tabla termodinámica del libro de texto, que contiene valores de ΔH_f aproximados a las décimas. Todos los alumnos conservaron en el resultado una cifra decimal.

Durante la puesta en común, Adela planteó su duda sobre la comparación de los valores de las cuatro ΔH_c: ¿cuál de los cuatro valores es menor, si el valor absoluto mayor es el del benceno, pero se trata de un valor negativo? En sus propias palabras:

Adela: Pero ¿para el combustible qué sería mejor, cuantooo... la entalpía fuera mayor o menor? Si la tiene muy baja, desprende mucha energía, ¿no?

Después de la aclaración del profesor, algunos hicieron referencia a la comparación de los valores de ΔH_c en sus respuestas al apartado B, aunque ninguno alude a los signos; solamente Diana considera que el valor del benceno es menor:

B. Si te piden consejo en la elección de un combustible, ¿cuál de estos cuatro compuestos aconsejarías? Justifica tu respuesta.

[Carlos]: (...) -Ademais (el benceno) debido a súa baixa ΔH desprende moita enerxía

[Adela]: (...) el benceno puesto que es el que tiene menor ΔH y por lo tanto libera más energía. Tambien hay que añadir que es el compuesto que más bajo tiene su Q.

[Clara]: O Benceno porque ten menor variación de entalpía

[Diana]: Benceno porque ten maior variación de entalpía (...)

En las manifestaciones finales sobre los resultados del apartado A, cinco estudiantes añadieron nuevas aportaciones como resultado del debate en gran grupo y la posterior reflexión en pequeño grupo. Las nuevas ideas de Ana, Adela, Diana, Clara y Darío comentan la necesidad de referenciar los resultados de ΔH_c al gramo de hidrocarburo que reacciona, con el fin de comparar las cantidades de energía producidas por masa de combustible. Las manifestaciones demuestran que estos alumnos realizaron una transformación de datos reflexiva y fructífera, no orientada mecánicamente a obtener un número como resultado de aplicar un algoritmo. Sin embargo, sólo Ana y Adela desarrollaron los cálculos. Analizando las manifestaciones correspondientes al apartado B, se observa que Diana, que Clara y Darío eran conscientes de la necesidad de transformar los datos para comparar el *poder energético* de los combustibles; pero se limitaron a copiar los resultados de Adela

Terminado el desarrollo del apartado A, Rodrigo anotó en la pizarra los datos finales de ΔH_c y abrió un tiempo de debate en pequeño grupo para dar respuesta a la cuestión abierta sobre la elección del mejor combustible de entre los cuatro hidrocarburos planteados. Las primeras ideas que surgieron se refieren al criterio termoquímico de la variación de entalpía de combustión y a dos criterios fisicoquímicos relacionados con la estructura molecular de los compuestos: el estado de agregación y la densidad. Por ejemplo:

[Profesor]: A ver, decídeme os criterios que tedes por agora.

[Darío]: A cantidade do que da en "A" e "B". (Se refiere a las variaciones de entalpía de combustión calculadas a partir de las correspondientes ΔH_f.)

[Profesor]: ¿Sería o único criterio?

[Benito]: Sí, e a… o volume que ocupa o combustible.

Pero a la hora de aplicar estos criterios, se presentó un obstáculo: no conocían los estados de agregación de los cuatro hidrocarburos a temperatura ambiente. Benito consideraba que el etano es un líquido, hasta que Darío lo convenció de lo contrario; entonces manifestó que los cuatro hidrocarburos son gases a temperatura ambiente. A la pregunta del profesor sobre el estado de agregación del benceno, solamente Alfonso dio la respuesta adecuada:

[Alfonso]: Líquido.

Rodrigo tuvo que cortar pronto el debate en pequeño grupo para clarificar las ideas que iban surgiendo y para aproximar el lenguaje de los alumnos al lenguaje científico, porque las expresiones que utilizaban algunos para referirse a los conceptos tratados hasta el momento se alejaban de las deseables:

B. Si te piden consejo en la elección de un combustible, ¿cuál de estos cuatro compuestos aconsejarías? Justifica tu respuesta.

[Ana]: O benceno, porque é máis denso e máis líquido, polo que é máis manexable (…)

Aclaradas estas ideas, el profesor animó a los alumnos a seguir con la introducción de criterios fisicoquímicos relacionados con la naturaleza química de los combustibles, esperando guiar el debate hacia los factores sociales, económicos y medioambientales.

La argumentación dentro de los grupos derivó progresivamente en una discusión global a iniciativa de los alumnos, que respondieron muy activamente a la afirmación de Berta:

[Berta]: Bueno, eu por Química non sei, pero quizá sería máis ben... no económico, e no rendemento que tuvera.

Con la expresión "rendimiento del combustible", Berta declaró que aludía a la energía liberada por cada mol de hidrocarburo reaccionado.

Desde este momento, los demás comenzaron a concretar ideas relacionadas con los aspectos CTS, y en poco tiempo surgieron, por este orden, los siguientes criterios: el precio de los carburantes en el mercado, las fuentes de extracción de los hidrocarburos, la relación entre la cantidad de energía liberada y la masa de hidrocarburo reaccionante, y la cantidad de dióxido de carbono producido por combustión de cada mol de hidrocarburo. El docente moderó el debate ayudando a sistematizar las observaciones, que iban surgiendo desordenadamente. Por ejemplo, en relación con el precio de los carburantes, tuvo que hacerles ver la necesidad de analizar las condiciones que lo determinan. De inmediato obtuvo dos respuestas:

[Berta]: A calidá.

[Darío[: Escaseza, e ó mellor onde tá.

Después se consultaron entre sí buscando nuevos criterios, hasta que Rodrigo les comentó la accesibilidad a la extracción del combustible. A la pregunta sobre las fuentes naturales de los cuatro hidrocarburos, también dudaron:

[Darío]: ¿(Proceden) da materia sólida?

Una vez que reconocieron el petróleo como materia prima de los cuatro compuestos, el docente les encargó que para el día siguiente buscaran información sobre la abundancia, la distribución geográfica y el precio de estos combustibles en el mercado, y que indicaran algunos detalles sobre su extracción y purificación. Los alumnos recordaron a Rodrigo que para el miércoles se había fijado la convocatoria de la huelga estudiantil en contra del plan Bolonia, y éste respondió que mayor empeño deberían poner entonces en trabajar en sus casas, por si el día de las movilizaciones tenían poco tiempo para las clases.

Al citar las posibilidades de transporte y almacenaje de los combustibles, se hizo explícita la conveniencia de conocer la cantidad de energía liberada por cada unidad de masa de hidrocarburo. No todos tenían claro el porqué de este criterio, como revelan las manifestaciones orales:

[Profesor] ¿Por qué e importante a masa?

[Carlos]: ¿Polo que intentou explicar Berta do rendemento?

[Darío]: Pero a variación de entalpía varía coa masa, ¿no?

Una vez trabajada la energía obtenida por unidad de masa, los alumnos centraron su atención en la cantidad de combustible que "se gastaba" para obtener una cantidad de energía, y de aquí surgió el siguiente criterio para seleccionar el mejor combustible de los cuatro:

[Berta]: ¿A contaminación, coa expulsión de ce-o-dos?

En ese momento, Rodrigo consideró oportuno dar paso a un debate en pequeño grupo para que pudieran calcular la cantidad de CO_2 producido y la cantidad de energía obtenida frente a la unidad de masa de combustible. Los alumnos, distribuidos en sus grupos de trabajo, tomaron nota de los criterios que se habían trabajado durante la puesta en común, y cinco referenciaron la variación de entalpía de combustión a la masa de hidrocarburo reaccionante: Ana, Adela, Diana, Clara y Darío. Ninguno llegó a comparar formalmente la cantidad de CO_2 emitido en las distintas combustiones, porque no realizaron los cálculos necesarios.

Berta y Brais fueron los únicos que no llegaron a elegir un combustible de entre los cuatro propuestos; de los ocho alumnos restantes, siete se decantaron por el benceno, y solamente Benito prefirió el etano, considerando que el benceno sería la mejor opción si no fuera tan contaminante:

B. Si te piden consejo en la elección de un combustible, ¿cuál de estos cuatro compuestos aconsejarías? Justifica tu respuesta.

[Benito]: O etano, porque é facil de manexar, contamina pouco e é o que mais enerxía libera despois do benceno, que é moi contaminante.

La *Tabla 5* (ver página siguiente) recoge los criterios que utilizaron los alumnos para justificar sus decisiones y los factores a los que apelaron sin llegar a ninguna decisión, antes y después de la intervención del profesor. Los resultados recogidos en la tabla solamente se corresponden con las manifestaciones del apartado C de la actividad en el caso de Ana y Adela; los demás no incluyeron nuevos criterios o factores en sus respuestas. La nomenclatura de las columnas de **Respuestas** distingue entre la utilización de una determinada magnitud fisicoquímica o aspecto CTS como criterio de decisión (rótulo c en la tabla) y la utilización como factor a tener en cuenta en una decisión finalmente no tomada (rótulo *f*); los subíndices $_0$ y $_f$ indican, respectivamente, que un determinado criterio o factor se recogió en las manifestaciones iniciales o finales del alumnado.

De los ocho alumnos que justificaron la elección de un combustible, seis citan como mínimo cuatro factores de decisión, aunque no lleguen a aplicarlos en la práctica para comparar las ventajas o inconvenientes de los distintos hidrocarburos; solamente Benito e Carlos llegaron a utilizar tres criterios.

Los criterios utilizados son cuatro (el estado de agregación del compuesto, la densidad, la ΔH asociada a la combustión y la contaminación generada), de los cuales uno pertenece al ámbito medioambiental y los otros tres son de naturaleza fisicoquímica; de éstos, dos tienen repercusión socioeconómica directa. Los ocho alumnos que utilizan criterios para justificar su elección, recurren al estado de agregación del compuesto, y el criterio de menor aceptación es la contaminación generada en la combustión, solamente citada por Benito a pesar de que otros siete alumnos lo reconocen como un factor a tener en cuenta y, entre ellos, cinco señalan

que puede medirse utilizando como indicador la cantidad de CO_2 emitido por mol o masa de combustible reaccionante. El éxito del criterio "estado de agregación" se explica si tenemos en cuenta que a los estudiantes les pareció muy llamativo que el benceno sea líquido a temperatura y presión ambiente. Ana, Alfonso, Carlos y Benito relacionan este criterio con el aspecto CTS de manejabilidad del compuesto, que, salvo para Benito, también se relaciona con la densidad.

Tabla 5: criterios y factores de análisis sobre la elección de un hidrocarburo como mejor combustible, extraídos de las manifestaciones escritas de los alumnos en sus respuestas al apartado A de la actividad Fp14

GRUPO	ALUMNO	RESPUESTAS										
		Aspectos fisicoquímicos					Aspectos socioeconómicos y ambientales					
		ΔH_c		Otros aspectos			Manejabilidad		Disponibilidad		Contaminación	
		ΔH_c/ mol	ΔH_c/ masa	Masa (molec.)	Rendimiento	Estado de agregación		Densidad	Abundancia	Precio	Sin especificar	CO_2 emitido
Ana, Alfonso y Adela	Ana	$f_{0,f}$	-	$f_{0,f}$	-	f_0	c_0	c_0	f_f	$f_{0,f}$	f_0	f_f
	Alfonso	f_0	f_0	-	f_0	f_0	c_0	c_0	f_0	f_0	f_0	f_0
	Adela	c_0	f_f	f_0	f_0	c_0	-	-	f_0	f_0	f_f	f_f
Carlos y Clara	Carlos	c_0	f_0	-	f_0	f_0	c_0	c_0	f_0	f_0	f_0	f_f
	Clara	c_0	f_0	f_0	-	c_0	-	-	f_0	f_0	-	-
Brais, Benito y Berta	Brais	-	f_0	-	f_0	f_0	-	-	f_0	f_0	f_0	-
	Benito	c_0	-	-	-	-	c_0	-	-	-	c_0	-
	Berta	-	f_0	-	f_0	-	-	-	f_0	f_0	f_0	-
Diana, Darío y Débora	Diana	c_0	-	-	-	c_0	-	-	-	-	-	-
	Darío	f_0	-	-	f_0	c_0	-	-	f_0	f_0	f_0	f_0
	Débora	*No realiza la actividad*										

Son mayoría (ocho) los que citan el valor de ΔH_c como un aspecto a tener en cuenta, pero solamente cinco lo utilizan como criterio de decisión, en su formulación como ΔH_c molar. Seis consideran que la ΔH_c másica un factor importante, pero ninguno llega a establecerla como criterio de decisión.

Se registran otros cuatro factores no vinculantes a decisión, dos de ellos de naturaleza fisicoquímica, y dos socioeconómicos:

De los fisicoquímicos, el más aceptado es el rendimiento de la combustión, cuya concepción es cercana o coincidente a la de la ciencia escolar, y no se refiere al *poder calorífico* o cantidad de energía liberada en la reacción. Ana, Adela y Clara apuntan a la "masa" (molecular) del hidrocarburo como un factor a tener en cuenta, parece que relacionándola implícitamente con la facilidad de transporte y almacenaje del combustible. Dado que Adela y Clara reconocen la conveniencia de comparar las ΔH_c másicas de los cuatro combustibles, parece que relacionan el *poder*

calorífico molar (que indica qué hidrocarburo es más rentable desde el punto de vista energético), con la rentabilidad de transporte y almacenaje del combustible: si la energía generada en la combustión de un mol es similar para dos hidrocarburos, resultará más rentable económicamente elegir el de menor masa molecular, cuyo transporte costará menos. Esta idea parece estar implícita también en las manifestaciones de Ana, que añade el factor "masa" (molecular) después de haber hecho hincapié en la comparación de la densidad y el "carácter líquido" de los compuestos: contrapone las ventajas de manipulabilidad que suponen que un hidrocarburo sea "más denso y más líquido" con la desventaja de que tenga una gran "masa" (molecular):

B. Si te piden consejo en la elección de un combustible, ¿cuál de estos cuatro compuestos aconsejarías? Justifica tu respuesta.

[Ana]: O benceno, porque é máis denso e máis líquido, polo que é máis manexable, aínda que hai que ter en conta outros factores como o prezo, a masa, a ΔH…

Los factores socioeconómicos utilizados son la abundancia natural de los hidrocarburos y el precio (de extracción), a los que hacen referencia todos salvo Benito y Diana Sin embargo, ninguno los desarrolla más allá de citarlos como ideas a tener en cuenta:

B. Si te piden consejo en la elección de un combustible, ¿cuál de estos cuatro compuestos aconsejarías? Justifica tu respuesta.

[Clara (razonamientos similares: Carlos, M D., Darío)]:

Criterio: $-\Delta H°$ $-\Delta H$

-O estado de agregación m

-prezo $-\underline{m_{CO_2}}$

-abundancia $m_{combustible}$

O Benceno porque ten menor variación de entalpía

Porque é un liquido

KJ/g

Al cerrar la reflexión en pequeño grupo sobre la selección de combustible, Rodrigo recordó a los estudiantes que para el día siguiente buscaran información sobre los hidrocarburos propuestos, y se procedió a dar respuesta a la tarea del apartado C. En las manifestaciones finales, los alumnos no llegarían a desarrollar los factores citados, porque no invirtieron tiempo ni esfuerzo fuera del aula para localizar la información necesaria. Se transcriben a continuación las respuestas de

Ana y Adela, las dos únicas alumnas que hicieron explícita alguna anotación al respecto, y que en general se interesaban y esmeraban en su trabajo:

D. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Ana]: (…)

Para decidir cal é o mellor combustible é necesario facer unha táboa de valores.

[Adela]: Hay que determinar la cantidad de CO_2 que se desprende por gramo de sustancia.

Por otro lado lo mejor seria medir la entalpia en KJ/g en vez de KJ/mol.

La segunda mitad de la sesión del martes se dedicó a la tarea del apartado C: justificar los valores de ΔH_c obtenidos en el apartado A. Los alumnos, dispuestos en sus grupos habituales, analizaron las causas de la exotermia de las reacciones propuestas, y se generó una discusión entre el grupo G_A y el G_C. Carlos consideraba que para identificar las diferencias en los valores de ΔH_c había que identificar las diferencias entre las combustiones propuestas, y encontraba dos, que se transcriben a continuación:

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

[Carlos]: Débese aos diferentes elementos que compoñen cada substancia e o nº de moles (…)

Frente a este razonamiento macroscópico, en el grupo de Ana, Alfonso y Adela se sostenía que la estructura química de los hidrocarburos también determina el valor de las transferencias energéticas; admitieron el argumento de Carlos para el caso de la formación de agua, recordando que el resultado de ΔH_c se ve influido por la elección de $\Delta H_f[H_2O_{(g)}]$ o de $\Delta H_f[H_2O_{(l)}]$, como se observa en las manifestaciones escritas de Alfonso:

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

[Alfonso]: Non só se debe á variación de auga senón tamen os tipos de enlaces que os unen, dobres, triples ou simples. Por exemplo no C_2H_2 e C_6H_6, no C_6H_6 deberia de dar o triple C_2H_2 pero da un pouco menos. (…)

Ana insistía también en el número de mol de CO_2, mientras que Adela defendía ante todo la perspectiva microscópica, que considera el número de enlaces que se forman:

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

[Ana]: - Ó tipo de enlaces que hai nos compostos, xa que dependendo de se é simple, doble ou triple necesítase máis enerxía para rompelos.

- Os productos resultantes na combustión (nº de moles de auga e de dióxido de carbono en cada composto).

[Adela]: A la rotura de enlaces. la ΔH_c depende de la energia necesaria para romper los enlaces y de la energia que se desprende. (…)

A través de Clara, que asistía a la escena sin aportar ideas y se volvió para bromear con Diana, el debate se extendió al grupo G_D. Mientras Diana y Clara charlaban en voz baja sobre temas no relacionados con la cuestión, Darío entraba en la discusión para defender el argumento macroscópico de la formación de los productos, con énfasis en la formación del agua, que a su juicio es un proceso altamente exotérmico:

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

[Darío]: Debido á formación dos productos. (En concreto á formac de auga) (…)

En G_C, sólo Benito trabajaba para elaborar una justificación sobre los valores de ΔH_c, mientras Berta y Brais charlaban entre sí, y fingían consultar algo en sus apuntes cuando se acercaba el profesor. Las manifestaciones escritas de Benito son adecuadas desde el punto de vista de la ciencia escolar:

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

A ΔH é a enerxía necesaria para a formación ou ruptura dos enlaces, varía nos diferentes compostos debido ó cambio na estructura dos enlaces

Ni Brais ni Berta consideraron esta respuesta lo suficientemente significativa o útil como para copiarla, y se limitaron a dejar en blanco el espacio correspondiente a los apartados C y D, sin aportar ninguna de las reflexiones surgidas en las puestas en común.

La respuesta escrita de Benito no aporta detalles sobre la relación que establecía este alumno entre la estructura química de las sustancias implicadas en las combustiones y la cantidad neta de energía liberada. Pero analizando las manifestaciones orales correspondientes a la puesta en común en gran grupo sí se pueden deducir algunas de sus ideas sobre los enlaces de los hidrocarburos.

El debate en gran grupo lo comenzó el profesor, al considerar que la discusión se estancaba porque los estudiantes decidieron centrarse en las rupturas

de los enlaces de los hidrocarburos y se encontraron con dificultades para identificar sus características. Aprovechó la discusión entre Ana y Adela sobre el enlace carbono–carbono del eteno, que Adela consideraba simple y Ana doble, y abrió paso a la puesta en común preguntando por qué razón los valores de ΔH_c son diferentes para las cuatro combustiones propuestas. La primera respuesta fue la de Darío, casi interrumpida por la de Alfonso:

[Darío]: ¿Á formación dos productos?

[Alfonso]: ¿Aos enlaces?

En un intento por clarificar su respuesta, Alfonso inició una comparación entre el enlace carbono–carbono del etano, que él consideraba covalente y doble, con un enlace simple hipotético; pero cuando intentó transferir su justificación el eteno, dudó si su razonamiento era válido y desistió de continuar defendiéndolo:

[Alfonso]: No primeiro hai dobles (…inaudible…), y libera máis enerxía o doble que o simple. (Unos segundo de silencio.) Non sei.

Este debate sobre la naturaleza de los enlaces de etano, etileno, acetileno y benceno tenía lugar dos días antes de que se realizara el examen tradicional sobre el tema de Química Orgánica, y Rodrigo, reprimiendo su enfado por que se presentaran tantas dificultades a aquellas alturas del curso, tuvo que ayudarles a identificar los tipos de enlace carbono–carbono de etano, eteno y etino. Los enlaces del benceno también ofrecieron dificultades:

[Benito]: Carbono – hidróxeno dobles.

Como solamente Ana parecía conocer las estructuras químicas de los cuatro hidrocarburos, Rodrigo detuvo el debate para ayudar a los demás a aplicar a estos compuestos el modelo de enlace covalente con el que llevaban trabajando desde el principio del curso.

Una vez más, los estudiantes solamente reconocían las rupturas de enlaces en las moléculas de los hidrocarburos, sin tener en cuenta la ruptura del oxígeno molecular ni las formaciones de nuevos enlaces químicos. A la pregunta de Rodrigo sobre si en la molécula de etano quedaría algún enlace sin romper, Darío respondió:

[Darío]: Sí, para obter ce-o-dous.

Después de aclarar esta cuestión, el docente introdujo las transferencias de energía asociadas a los procesos de ruptura de los enlaces químicos, preguntando a los alumnos si los describirían como exotérmicos o endotérmicos. Nuevamente, las opiniones de los alumnos no eran unánimes al respecto:

[Carlos]: ¿Exotérmicos?

[Alfonso]: ¡No, endotérmicos!

Se discutió el valor de ΔH_f de los hidrocarburos en relación con la formación de los enlaces implicados, y los alumnos vincularon la cantidad de energía involucrada en las rupturas a la formación de enlaces químicos y a la fuerza de los mismos. Por ejemplo, Benito expresó que el valor de ΔH_f del benceno era aproximadamente el doble del valor de ΔH_f del etano debido a:

[Benito]: A enerxía dos enlaces dobles.

Se presentaron más dudas para analizar los enlaces que se forman. Mientras Rodrigo detallaba en la pizarra las estructuras de Lewis de todos los reactivos de las combustiones, los alumnos iban proponiendo en voz alta cómo son los productos y los tipos de enlace que se generan:

[Adela]: ¿Enlaces de hidrógeno? (Para el agua.)

[Berta]: ¿Simples? (Para el CO_2.)

[Ana]: En el dióxido de carbono ¿no sería doble?

El profesor tuvo que intervenir para ayudarles a clarificar las estructuras químicas del agua y el dióxido de carbono. La introducción de los modelos de enlace sirvió de base para analizar la diferencia entre las cantidades de energía liberadas en las diferentes combustiones, en función de las distintas cantidades que se generan de los productos. En palabras de Alfonso:

[Alfonso]: Porque se forma máis enerxía de auga e ce-o-dous.

Aceptaron que la formación de enlaces va asociada a una liberación de energía, y que la exotermia de las combustiones es el resultado del balance entre la energía absorbida por el sistema (invertida en la ruptura de interacciones químicas) y la liberación de energía al entorno debido a la formación de las nuevas interacciones. Como ejemplo se transcribe la respuesta escrita de Clara a la cuestión planteada en el apartado C:

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

[Clara (razonamientos similares: Ana, Alfonso, Carlos, Adela, Diana, Darío)]: Na formación de enlaces dobles entre C=O e simples entre O–H, que desprenden enerxía

A enerxía que se absorve cando se rompen os enlaces simples entre C–H, C–C dobles entr C=C, O=O, e triples entre C≡C

El docente utilizó las ideas surgidas durante esta fase de construcción de conocimiento, para sugerir que las transferencias de energía asociadas a las rupturas y formaciones de enlace pueden representarse mediante una variación de entalpía, al igual que cualquier otra de las transferencias de energía con las que habían trabajado hasta entonces. Con los valores de ΔH_{enlace} se pueden estimar las

variaciones de entalpía asociadas a cualquier reacción con una precisión aceptable y con la ventaja de no tener que realizar determinaciones calorimétricas. Presentó a los alumnos la tabla de ΔH_{enlace} que recogía el libro de texto, a la que Ana e inicialmente Alfonso habían recurrido ya para calcular las ΔH_c planteadas en el apartado A.

Durante la puesta en común en gran grupo, los alumnos aprovecharon para anotar en sus guiones de trabajo las ideas que consideraban relevantes para elaborar sus respuestas. Curiosamente, ninguno recogió por escrito las estructuras de Lewis de las que Rodrigo se había valido para construir una perspectiva microscópica sobre la dinámica de la reacción química, en la que los procesos de ruptura y formación de enlaces suceden a la vez en el sistema. Tampoco hicieron referencia escrita a la relación entre la estabilidad de los enlaces químicos y las transferencias energéticas asociadas a ellos. Sin embargo, salvo Brais, Benito y Berta, todos reprodujeron la tabla que se construyó en el encerado para enumerar los tipos de enlaces formados y rotos en las combustiones. Se transcribe a continuación la tabla realizada por Darío:

C. Explica detalladamente a qué consideras que se deben las diferencias que observas en los valores de ΔH_c.

[Darío (razonamientos similares: Ana, Alfonso, Carlos, Adela, Diana, Clara)]:

Eª desprendida	Eª absorvida
Formación	C-H
C=O	C-C
H-O	C=C
	C≡C
	C-C
	O=O

Cuando se terminó la puesta en común, quedaba muy poco tiempo de clase. El profesor recomendó a los estudiantes que emplearan los últimos minutos en empezar a responder al apartado D, donde se les pide que anoten sus reflexiones sobre los cambios de ideas que han tenido lugar en el desarrollo de la actividad. Durante la sesión siguiente, en la que se haría la elección del mejor combustible, se dejaría más tiempo de trabajo en pequeño grupo para terminar los apartados B y D.

Debido a la huelga, a la segunda sesión de *Fp14* asistieron solamente cinco alumnos (Ana, Alfonso, Benito, Clara y Darío). Llegaron diez minutos más tarde de lo previsto y no demostraron el menor interés por desarrollar los aspectos CTS de la actividad. Rodrigo exteriorizó su decepción y enfado por la apatía generalizada, que frustró sus planes de introducir en el debate sobre la elección de un combustible atendiendo a nuevos criterios, como la inercia química del hidrocarburo y su relación con la toxicidad, o la rentabilidad de extracción en función de aspectos

tecnológicos, la disponibilidad en el mercado y su influencia de los intereses geoestratégicos en función de los acuerdos políticos y económicos. El profesor dio por perdida la oportunidad de potenciar la interdisciplinaridad mediante esta cuestión abierta, y recordó a los estudiantes que la calificación de la asignatura se basaba, en buena medida, en el rendimiento que mostraran en el desarrollo de las actividades. Decidió recurrir al "truco de urgencia" de la demanda académica, y anunció que al día siguiente, al comenzar el examen, recogería los guiones de trabajo para evaluarlos, junto con los informes de las prácticas de calorimetría. Al día siguiente, los alumnos entregarían los guiones de las actividades tal como quedaron después de esa sesión, sin añadir nuevas manifestaciones escritas.

El desarrollo de la actividad se basó en el trabajo en un único grupo formado por los cinco asistentes y, después de unos minutos de reflexión en grupo para completar el apartado D de la actividad *Fp14*, Rodrigo decidió centrarse en el desarrollo de la actividad *Fp15*.

Sobre las manifestaciones escritas finales (apartado D) que los alumnos produjeron entre el martes y el miércoles destaca, en primer lugar, que no se aprecian diferencias significativas entre el rendimiento de los cinco alumnos que asistieron el miércoles a clase y los demás. Aparecen pocas ideas relacionadas con la perspectiva microscópica construida en clase, porque solamente Darío (presente en la sesión del miércoles) e Carlos hicieron referencia a los aspectos de enlace y estructura de la materia. Brais, Benito, Berta, Diana y Clara no elaboraron ninguna respuesta al apartado, y Ana, Alfonso y Adela no incluyeron ninguna reflexión sobre la dinámica microscópica de las combustiones propuestas. Las aportaciones de Carlos y Darío, bastante breves, se transcriben a continuación. Darío comenta que las variaciones de entalpía de las combustiones son negativas debido a la energía liberada en la formación de los productos, y reconoce las transferencias de energía asociadas a las rupturas de enlaces de los reactivos. Carlos se limita a comentar la importancia de los temas microscópicos que se trabajaron en la actividad:

C. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Darío]: Que a ΔH é debida a formación dos productos, xa que a enerxía esta presente na ruptura e formación de enlaces.

[Carlos]: Explicounos a importancia e os tipos de enlaces que se dan nas reacción, tamén a forza destos

Acabada la sesión del miércoles, las impresiones del profesor sobre el desarrollo de *Fp14* reflejaban amargura y decepción por el poco afán de trabajo de los alumnos y por el previsible fracaso que tendrían en el examen tradicional, que sería al día siguiente. Como se comenta en el apartado correspondiente a la

implementación de la actividad *Fp15* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp15: "¿quemando calorías?"*, pág. 698), cuando se cerró el debate final en pequeño grupo y Rodrigo propuso a los alumnos dedicar los últimos minutos de la sesión a la consulta de dudas para el examen, éstos respondieron que no tenían dudas y decidieron dar por terminada la clase cinco minutos antes de la hora prevista. Esto, sumado a la escasa asistencia a clase y a la dejadez que mostraron los estudiantes en la búsqueda de la información sobre los aspectos CTS de *Fp14*, dejaron a Rodrigo una impresión de "derrota total" en el cumplimiento de los objetivos actitudinales. Reconoció que no le habían sorprendido, aunque sí enfadado, los escasos conocimientos que tenían sobre las estructuras químicas de sustancias orgánicas "tan simples". No estaba sorprendido, decía, porque este tipo de dificultades se presentaban una y otra vez a lo largo de todos los cursos escolares y en todos los temas objeto de estudio; pero le había "sacado de quicio" que dos días antes de un examen tuvieran tantas dudas para formular hidrocarburos sencillos y describir sus estructuras de enlace.

A pesar del mal estado de ánimo que le habían dejado aquellas dos sesiones, se sentía gratamente sorprendido de que los alumnos aplicaran tan rápido la noción de las transferencias energéticas a procesos microscópicos como la ruptura y la formación de enlaces. El funcionamiento interno de G_A (Ana, Alfonso y Adela) le parecía adecuado, y en cuanto a G_C y G_D, consideraba que podrían funcionar "a medio gas", con un miembro activo y el otro, "intermitente". Temía, eso sí, que la dinámica del grupo de Brais, Benito y Berta (G_B) perjudicase a Benito, aunque Rodrigo se veía capaz de ayudarle sin "tener que hacer grandes aspavientos", esto es, grandes cambios en la dinámica de trabajo de los grupos. Le parecía que Benito, por su personalidad y sus conocimientos, no tendría los problemas que habría tenido al verse en su situación un alumno de baja autoestima y pocos conocimientos. En cuanto a Débora, Rodrigo consideraba que prácticamente no volvería a las sesiones de clase, esperando aprobar la asignatura en la convocatoria de septiembre. Manifestó su convicción de no intervenir en el caso de Débora declarándola *ausente*, porque esta declaración proporcionaría a la alumna una convocatoria adicional de examen, a la que no podían acceder sus compañeros que asistían regularmente a clase.

Sobre los casos de "semi-absentismo" de Carlos, que llegaba tarde muchos días por quedarse dormido, y de Diana, que faltaba a algunas sesiones sin justificación, respondió que desde hacía varios años en el Instituto estaban concediendo relativamente poca importancia a los partes de justificación de faltas, porque en general sólo servían para constatar que los padres de los alumnos "están enterados (de la ausencia a clase)", no para verificar si "las faltas son justificables". Era frecuente que los estudiantes se presentaran en el centro con justificantes de faltas por estudiar para un examen, por ir al una revisión médica "¡3 horas antes (de la clase)!", y situaciones similares. Al mismo tiempo se podía dar la situación

inversa: que un alumno tuviera sobrados motivos para que su falta estuviera justificada, y que no aportara volante de justificación. Por ejemplo, Berta faltó a algunas sesiones después del vendaval porque la explotación ganadera en la que trabajaban sus padres quedó aislada en las montañas de la Capela, sin suministro eléctrico, así que ella se vio prácticamente incomunicada y con la urgencia de tener que trabajar durante varias semanas en la granja para que las pérdidas económicas de la granja familiar se minimizaran en lo posible.

A continuación se describe la implementación de la actividad *Fp15*, en la que los alumnos aplicarían los modelos de la Química microscópica en la elaboración de razonamientos justificativos sobre el procesado metabólico de los carbohidratos y de los lípidos contenidos en los alimentos.

III.2.2.15. Aplicación y desarrollo de la actividad *Fp15*: "¿quemando calorías?"

En la actividad de aplicación *Fp15* (*Tabla 28*, ***Volumen A***) se analiza el metabolismo de los carbohidratos y lípidos como un proceso de características similares a las combustiones calorimétricas. Con ello se pretende que los estudiantes elaboren una interpretación termodinámica de la degradación metabólica de estos nutrientes y tomen decisiones científicamente fundamentadas para la planificación de una dieta saludable. Como ya conocen la bioquímica básica de estos nutrientes, gracias a la asignatura de Biología, con *Fp15* se pueden integrar las descripciones e interpretaciones de los dominios macroscópico y microscópico y elaborar razonamientos de gran poder interpretativo. También se tratarán algunos aspectos relacionados con el nivel simbólico de representación del conocimiento: mediante la reflexión sobre el significado de dos expresiones cotidianas muy populares relacionadas con la nutrición, al comienzo de *Fp15* se ofrece a los alumnos una ocasión de comprobar las diferentes potencialidades comunicativas y áreas de aplicación del lenguaje cotidiano y el lenguaje científico. Como ya hemos indicado en la revisión de la literatura del área (***Volumen A***), no se trata de estigmatizar el lenguaje cotidiano, sino de que los estudiantes reconozcan y valoren positivamente su utilidad en determinados contextos, al tiempo que se enfatiza en la necesidad de adoptar el lenguaje de las Ciencias en aquellos ámbitos comunicativos relacionados con la construcción y divulgación del conocimiento científico. Para que los alumnos adopten el lenguaje de la Ciencia en la elaboración de sus razonamientos argumentativos, proponemos que trabajen con tareas que pongan en evidencia las desventajas del lenguaje cotidiano en la expresión de ideas científicas.

Después de consensuar las expresiones más adecuadas para analizar los aspectos energéticos del metabolismo de los carbohidratos y de los lípidos, se plantea otra cuestión relacionada con el dominio simbólico: la elección de las

unidades de valor energético. Con ello se pretende que los alumnos perciban que la complejidad de la composición química de los alimentos obliga a expresar el balance de las transferencias energéticas en unidades de energía referenciadas a la masa de alimento procesado.

Inmediatamente, se pide a los estudiantes que transfieran sus conocimientos sobre Termoquímica para dar respuesta a un problema de gran relevancia en la vida cotidiana: la planificación de una dieta equilibrada, que aporte los nutrientes esenciales en cantidades adecuadas para el desarrollo sano del organismo. Para facilitar la elaboración de razonamientos argumentativos basados en las relaciones termodinámicas, se establece la comparación de los valores energéticos de varios alimentos comunes. Con ello, se pretende que los alumnos identifiquen estos datos como resultados del balance energético de la oxidación metabólica de los nutrientes, esencialmente carbohidratos y lípidos: el valor energético proporciona una estimación aceptable de la variación de entalpía asociada a la oxidación de los carbohidratos y lípidos contenidos en el alimento. En un nivel interpretativo más profundo, se recurre a los modelos de enlace y estructura de la materia para justificar los intercambios energéticos que se producen entre el organismo (sistema) y su entorno como consecuencia del metabolismo. Las dos principales dificultades para construir esta interpretación microscópica son las siguientes:

En primer lugar, los alumnos deben reconocer la estructura molecular básica de los carbohidratos y de los lípidos. Dada la heterogeneidad estructural de éstos, el docente puede facilitar a los estudiantes la estructura general de los ácidos grasos para ilustrar una de las estructuras prototípicas de las sustancias lipídicas.

En segundo lugar, el proceso metabólico es muy complejo tanto por las numerosas reacciones químicas que implica como por la mediación enzimática que se requiere para que éstas sucedan en condiciones fisiológicas. La profundidad interpretativa a la que se puede llegar en el desarrollo de la actividad queda, nuevamente, a juicio del profesor.

Una vez interpretado el proceso metabólico desde los dominios macroscópico y microscópico, los alumnos ya pueden dar respuesta a la cuestión abierta del apartado E: elegir criterios con los que seleccionar una dieta saludable. Se les pide que elaboren justificaciones relacionadas con dos tipos de criterios:

El criterio termoquímico del balance energético organismo-entorno sirve para justificar la utilidad de los datos de valor energético de los alimentos en la configuración de la dieta, atendiendo a los principales procesos de calor y trabajo involucrados en la actividad diaria. Al estudiar el organismo humano como un sistema termodinámico, se pone de manifiesto que cada individuo debe estimar sus necesidades nutricionales en función de sus interacciones con el entorno, las cuales dependen del estilo de vida de la persona. El otro criterio en el que deben basar sus decisiones sobre una dieta saludable es de tipo bioquímico: los alumnos harán

explícitas y justificarán sus ideas sobre informaciones que necesitarían aparte de los datos termoquímicos. La respuesta a esta cuestión requiere poner en práctica conocimientos sobre las necesidades orgánicas relacionadas con nutrientes como las proteínas, las vitaminas, las sales minerales o el agua, y los criterios bioquímicos seleccionados se tendrán en cuenta junto con los criterios termoquímicos que se extraen de los datos de valor energético de los alimentos.

Como ya se ha comentado en el apartado sobre el desarrollo de *Fp14* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp14: la "entalpía de enlace"*, pág. 678), *Fp15* se implementó en el aula en la sesión anterior al examen tradicional: el miércoles para el que se había convocado una huelga contra la implantación del plan Bolonia. A esta sesión asistieron cinco alumnos (Ana, Alfonso, Benito, Clara y Darío), y la clase había comenzado unos diez minutos tarde; Rodrigo reservó los cinco últimos minutos para resolver dudas sobre el examen del día siguiente, así que para el desarrollo de *Fp15* se dispuso de algo menos de media hora, una vez terminada la actividad *Fp14*.

Los cinco alumnos, dispuestos en un único grupo de trabajo, comenzaron leyendo el guion de *Fp15* y elaborando respuestas para los tres primeros apartados, en los que se les pedía que reflexionaran sobre las expresiones cotidianas "contenido calórico de los alimentos" y "quemar calorías", y sobre la razón por la que se han adoptado las kcal/g en lugar de las kcal/mol para expresar los valores energéticos de los alimentos.

Inmediatamente después de abrir el tiempo de trabajo en grupo sin intervención inicial del profesor, se observó que los alumnos rehuían el debate y trabajaban en silencio, porque acababan de recibir la reprimenda de Rodrigo, sentían la presión del examen del día siguiente y la demanda académica estaba haciendo efecto en la dinámica de grupo. El profesor esperó un par de minutos sin intervenir, para que los estudiantes tuvieran la oportunidad de tranquilizarse por sí mismos y rebajar la tensión; el hecho de sentirse reubicados en un único grupo al que no estaban acostumbrados, tampoco ayudaba a generar la confianza necesaria para abrir un debate útil. Rodrigo comentó en voz baja a la investigadora que el "truco de urgencia" de la demanda académica "solía funcionar", en el sentido de que inmediatamente después de las "broncas" los alumnos tendían a intensificar su trabajo personal, pero con la contrapartida de que se les despertaba una competitividad que les hacía abandonar la interacción con los compañeros y con el profesor y se escondían de la "notoriedad pública". En efecto, escribían sus respuestas en silencio, y si intercambiaban alguna idea, era únicamente con sus habituales compañeros de pequeño grupo y en voz tan baja que las grabadoras de audio colocadas sobre la mesa no registraban las manifestaciones orales con claridad. Ana y Alfonso intercambiaron alguna impresión, pero Benito trabajaba solo y Darío escribía con la cabeza hundida entre los hombros. Clara, de carácter

introvertido y autoestima baja, miraba de vez en cuando a sus compañeros pero apenas se comunicaba con ellos. No era conveniente mantener esta dinámica poco propicia a generar y compartir conocimiento, así que el docente decidió cortar el debate en pequeño grupo y pasar a una puesta en común de las ideas surgidas.

Al preguntarles qué entendían por "contenido calórico de los alimentos", Darío fue el único que ofreció una respuesta:

[Darío]: Cantidade de enerxía que se producen ó ser degradados os alimentos.

Sin embargo, no supo aclarar a qué se refería con la expresión "degradarse los alimentos". Alfonso le ayudó:

[Alfonso]: ¿Cando se descompoñen?

Los cinco manifestaron que la expresión "contenido calórico de los alimentos" les parecía científicamente adecuada, porque se refiere a la cantidad de energía por calor que se libera con la degradación de los alimentos. Alfonso declaró que el calor es una "forma de energía"; Ana, Benito y Clara lo describieron como un proceso de transferencia energética.

A continuación se transcriben las respuestas iniciales de Ana, Alfonso, Benito y Clara:

A. ¿A qué se refiere la expresión "contenido calórico de los alimentos"? ¿Te parece científicamente adecuada? Justifica tu respuesta.

[Ana (razonamientos similares: Benito, Clara)] :- Cantidade de enerxía que producen os alimentos ó ser degradados.

- Sí, porque se libera enerxía por un proceso de calor.

[Alfonso]: Porque libera enerxía ó degradarse o alimento.

Si, porque a enerxía se libera en forma de calor

No se conservan las manifestaciones escritas de Darío. En el día del examen, entregó al profesor todos sus guiones de trabajo salvo el de *Fp15*, que al parecer no encontraba entre sus apuntes. Aunque en días sucesivos Rodrigo le recordó varias veces que tenía que entregar el guion que faltaba, la única respuesta de Darío era que no localizaba el guion en ninguna parte por más que buscaba. Las entrevistas a los profesores del centro confirman que este tipo de despistes eran habituales en este alumno, y la propia investigadora pudo comprobarlo cuando, después de las pruebas de retención, realizó las entrevistas a los alumnos de la muestra, a los padres de éstos y a los docentes que impartían las distintas materias: poco antes de comenzar la entrevista a Rodrigo, Darío telefoneó al profesor para excusarse por haber faltado el día anterior a la recuperación de la tercera evaluación (¡se había

olvidado de la fecha de examen!), y pidió que le fijasen una nueva fecha de recuperación. Así pues, el "truco de urgencia" del "premio académico" no siempre da los resultados esperados, y varios profesores confirman que Darío no es el único alumno que falta a un examen sin justificación alguna y luego exige que los docentes habiliten una nueva fecha de convocatoria sólo para su caso particular.

Durante el desarrollo de *Fp15*, la intervención del profesor pareció convencer a los estudiantes de aceptar que la expresión "contenido calórico" no es científicamente adecuada, puesto que las calorías son unidades de energía, no magnitudes físicas atribuibles a los sistemas. Sin embargo, ninguno de los cuatro alumnos enmendó las manifestaciones iniciales; únicamente Ana elaboró una respuesta al apartado F, en el que se pide la reflexión sobre las ideas desarrolladas en la actividad, y en su respuesta no escribió nada que se pueda relacionar con un comentario sobre conocimientos del dominio simbólico.

La idea central del debate en gran grupo ayudó a los alumnos a identificar como científicamente inadecuada la expresión "quemar calorías". Todos reconocían el metabolismo como un proceso similar a una combustión, así que el término "quemar" no les parecía desacertado; consideraban que era parcialmente incorrecta:

[Darío]: Máis ou menos.

[Profesor]: Explícanos.

[Darío]: Claro, porque é parecido a... (Duda de sus propia respuesta.)

[Ana]: (Le ayuda a completar la respuesta.) unha combustión.

Cuando Rodrigo les puso como ejemplo el uso de esta expresión en los anuncios publicitarios y les preguntó si los publicistas se referían a la "combustión metabólica", los alumnos negaron con la cabeza y se quedaron pensativos, intentando encontrar las palabras adecuadas para describir sus ideas. Fue Alfonso el primero en contestar:

[Alfonso]: ¿A facer exercicio?

Benito negó con la cabeza y afirmó, convencido:

[Benito]: A liberar enerxía.

[Alfonso]: (Corrigiéndose.) Utilizamos a enerxía dos alimentos.

Sin embargo, Alfonso no incluyó esta idea en sus manifestaciones escritas, que revelan una equivalencia entre las palabras "caloría" y "energía". La incoherencia en su respuesta hace difícil determinar si consideraba el calor y el trabajo como procesos de transferencia de energía o como formas de energía, pero sus demás respuestas refuerzan la impresión de que mantenía la estructura alternativa de las "formas de energía":

B. En la publicidad, se utiliza muy frecuentemente la

expresión "quemar calorías". Desde el punto de vista científico, ¿crees que esta expresión es adecuada? Justifica tu respuesta.

[Alfonso]: Si, xa que ó degradar alimentos obtemos enerxía e ó queimar as calorías e libérase o traballo e o calor.

Las repuestas de Ana y Clara revelan un proceso de cambio conceptual desde la estructura alternativa de las "formas de energía" hacia la científicamente aceptada. En el apartado A, ambas alumnas reconocieron explícitamente el calor como un proceso por el que se transfiere la energía, pero en el B, al centrar su atención en la idea de que las calorías son una unidad de medida de la energía, parecieron olvidarse totalmente de las transferencias por calor, y pasaron a hablar de la "forma de calor".

B. En la publicidad, se utiliza muy frecuentemente la expresión "quemar calorías". Desde el punto de vista científico, ¿crees que esta expresión es adecuada? Justifica tu respuesta.

[Ana (razonamientos similares: Clara)]: Non, consiste en liberar ó entorno enerxía en forma de traballo e calor.

Por su parte, Benito ofreció una respuesta más detallada a la cuestión. Manifestó que calor y trabajo son procesos por los que se expulsa la energía al entorno como consecuencia del metabolismo:

B. En la publicidad, se utiliza muy frecuentemente la expresión "quemar calorías". Desde el punto de vista científico, ¿crees que esta expresión es adecuada? Justifica tu respuesta.

[Benito]: Non, porque as calorías é a nosa medida do calor liberado o proceso. Esta expresión refírese a expulsar ó entorno enerxía nun proceso de calor e traballo

La tercera cuestión, también relacionada con el dominio simbólico de representación del conocimiento, se refiere a la expresión de los valores energéticos de los alimentos en kcal/g en lugar de las unidades más trabajadas en el aula: kcal/mol. Ya en las manifestaciones iniciales de los alumnos se observa que todos reconocen que los valores de las transferencias de energía correspondientes a la combustión metabólica se referencian a la masa de alimento procesado porque resulta más cómodo. Para Alfonso, el cálculo en kcal/g es directo y elimina la necesidad de utilizar factores de conversión. Ana, Benito y Clara ofrecen respuestas más acordes con la ciencia escolar: según las dos alumnas, si se expresaran los valores energéticos en kcal/mol no se podrían obtener valores tan exactos, y para Benito, que da una respuesta más completa, existe una gran dificultad de determinar ("adivinar") el "número de moles de alimento", mientras que con una simple pesada se obtiene la cantidad de energía producida por cada unidad masa en el metabolismo del alimento:

C. ¿Por qué los valores de "contenido calórico de los alimentos" suelen expresarse en kcal/g, y no en kcal/mol?

[Alfonso]: Porque así pódese calcular as Kcal que terían eses alimentos directamente coa súa masa.

[Clara (razonamientos similares: Ana)]: -Porque nos permite calcular valores máis exactos

[Benito]: Porque nos é mais facil calcular as súas calorías, porque é moi facil pesar un alimento pero é moi difícil adiviñar os seus moles

Nuevamente, la intervención del profesor no generó ninguna modificación de las manifestaciones iniciales de los estudiantes.

Una vez elaboradas las respuestas a las cuestiones de tipo simbólico, se abordó la cuestión D, mediante la que se pretende que los alumnos justifiquen las diferencias entre los valores energéticos de diferentes alimentos en función de la composición y estructura química. Rodrigo recomendó que eligieran dos o tres alimentos para ilustrar con ejemplos sus razonamientos interpretativos, y abrió un tiempo de debate en pequeño grupo.

En las manifestaciones iniciales todos reconocieron que los valores energéticos de los alimentos dependen de la composición química de éstos, y que los alimentos cuya composición es rica en sustancias lipídicas tienen un mayor valor energético porque la metabolización de los lípidos implica una mayor transferencia energética entre el sistema y el entorno. Los ejemplos de alimentos seleccionados contraponen los valores de la mantequilla, formada por lípidos en su totalidad (según Alfonso y Clara) o en su mayor parte (según Ana y Benito) con alimentos proteicos como los huevos (Ana, Alfonso y Clara) o la carne (por la que se decide Benito, el único que cita como ejemplo de sustancia lipídica los ácidos grasos y que, quizá, tuviera presente la cantidad de lípidos que contienen los huevos). La única que compara explícitamente los valores energéticos es Clara, que utiliza adecuadamente los signos para indicar las transferencias energéticas implicadas:

D. ¿A qué se deben las diferencias que observas entre los datos de "valores energéticos" para los diferentes alimentos?

[Benito]: Se deben á súa composición, por exemplo a manteiga ten moitos lípidos o ácidos graxos, mentres que a carne está composta por proteínas.

[Clara]: Depende de la composición de cada alimento.

La mantequilla está composta por lípidos q poseen un valor energético de –34 KJ/g mientras que los huevos están compuestos por proteínas q poseen un valor energético de –6

Durante la puesta en común de ideas, Rodrigo se esforzó por facilitar la introducción de ideas del dominio microscópico, pero los intentos fueron infructuosos por la falta de conocimiento que tenían los alumnos sobre las estructuras químicas de los nutrientes básicos. Los contenidos relacionados con estos temas se trabajan en la primera evaluación de Biología, materia que cursaban todos los alumnos de la muestra salvo Adela y Diana La investigadora indagó en estos aspectos durante la entrevista a Mercedes, la profesora de Biología, y ésta le respondió que en general, aunque los alumnos identificaran como "enlace peptídico" el que une los aminoácidos de las proteínas, o como "enlace glucosídico" el que enlaza los monósacáridos de los glúcidos, no necesariamente reconocían estos enlaces como interacciones covalentes entre átomos. Su experiencia personal le indicaba una desconexión casi total de los conocimientos de Química y Biología, a pesar de que la instrucción por parte de los profesores de ambas materias se dirigía a la interdisciplinaridad de las Ciencias. Achacaba este fracaso a una falta generalizada de compresión conceptual y procedimental, más que a deficiencias en la comprensión lectora. Según Mercedes, los textos sobre los que se trabaja en la asignatura de Biología no resultan difíciles de entender por la manera en la que están redactados, sino por la escasa significatividad que tienen para muchos estudiantes algunos de los conceptos y procedimientos centrales de la Biología, la Geología y las demás Ciencias. Como ejemplo, manifestó que todos los años le costaba bastante hace ver a los alumnos de 2º de Bachillerato por qué el agua es un buen disolvente de los compuestos orgánicos que forman parte de los seres vivos, porque se encontraba con que casi ninguno era capaz de aplicar la idea de polaridad al agua y a las sustancias orgánicas, ni de estimar la estabilidad de las distintas interacciones químicas. Consideraba que seguramente en la asignatura de Química sucedía lo mismo con los conceptos y procedimientos de la Biología, materia que para la mayoría del alumnado se estudia mediante la memorización irreflexiva de los párrafos del libro de texto en el orden y manera en el que vienen redactados. Describió la capacidad media de razonamiento de los estudiantes en clase de Biología de la siguiente manera:

[Mercedes]: (A la pregunta de cómo utilizan los razonamientos argumentativos los estudiantes en clase de Biología) Fatal. Es más, ellos quieren que tú les subrayes el… las… lo que es lo más importante. A mí me lo llegaron a pedir, pero no este año, varios años, ¿eh? "¿No podrías decir qué es lo más importante?"

Para esta docente, las dificultades de comprensión abarcan también los procedimientos básicos de comprensión de textos; por ejemplo, una vez leído un texto sobre las características de las células y sus orgánulos más representativos, a muchos alumnos les cuesta establecer relaciones comparaciones entre elementos:

[Mercedes]: Si yo les digo: "la célula eucariota". Les digo, y bueno, de maravilla. "La célula procariota", también me lo ponen. Pero: "Compara…" (Hace un gesto de

negación con la cabeza.) O… Yo qué sé: "Composición de la pared de las gram positivas". Te lo conte –si yo pregunto eso, sé que la inmensa mayoría me lo va a contestar bien. "Composición de la pared de las bacterias gram negativas", y también me lo van a hacer bien. En el momento que digo: "Señala las diferencias entre la pared de la pared de las gram positivas y las gram negativas", ya –la respuesta no es tan correcta, no está tan bien. Y siempre va a haber… o sea, les es difícil comparar. A lo mejor lo que te ponen es todo de uno y to –les dices, no, compara… (…) Y además te dicen: "es que si pusieras así era más fácil" (…) Y además saben que es el tipo de preguntas que más me gustan, porque además… ¡lo saben!

En *Fp15*, la falta de conocimientos sobre la estructura de los nutrientes impidió la construcción de un razonamiento argumentativo de basado en el desarrollo de los modelos de estructura y enlace de la materia, y Rodrigo se contentó con que los alumnos elaboraran una explicación macroscópica para los valores energéticos de distintos alimentos en función de las mayores o menores transferencias energéticas que implicarían los cambios de composición. El debate en gran grupo comenzó con la comparación de las composiciones químicas, puesto que todos los estudiantes reconocían que la composición en nutrientes era la clave de las diferencias que observaban en los valores energéticos de los distintos alimentos; pero les costó reconocer la composición de alimentos tan comunes como la cerveza:

[Profesor]: ¿Qué es la cerveza, en mayor parte? (Silencio.)

[Benito]: Cereales. (Otro pequeño silencio.)

[Ana]: Auga.

Aclarada la composición de la cerveza, Rodrigo introdujo el concepto de transferencia energética en relación con los nutrientes citados:

[Profesor]: ¿Cál é o valor enerxético da auga?

[Alfonso]: Un. (Comprueba qué efecto hace esta afirmación en Rodrigo, y al verlo extrañado y a punto de preguntarle la razón de tal respuesta, de inmediato se corrige:) –¡Cero! (Ana se ríe.)

Al preguntarles los motivos de que la ingestión de agua no venga asociada a una transferencia energética apreciable desde el organismo al entorno, los alumnos no supieron responder, y Rodrigo les recordardó a qué se deben las transferencias energéticas en los procesos químicos. Después de la intervención, ninguno de los cinco estudiantes modificó sus declaraciones sobre el apartado D.

Como Rodrigo no quería resignarse a que los contratiempos en la introducción de los modelos microscópicos hicieran fracasar la construcción de un razonamiento interpretativo sobre el metabolismo, decidió terminar el debate en gran grupo con un ejemplo de su cosecha: por qué la cantidad de energía que se

libera cuando se procesa una cantidad de patatas fritas es casi siete veces mayor que la cantidad de energía producida por la metabolización de la misma cantidad de patatas cocidas. Con este ejemplo, sobre el que ningún alumno realizó anotaciones, terminó el desarrollo del apartado D y se abrió un tiempo de debate en pequeño grupo para resolver la cuestión del apartado E.

De inmediato, los estudiantes reconocieron que los datos de "contenido calórico" de los alimentos estiman la cuantía de las transferencias energéticas netas implicadas en el metabolismo, y por ello son un criterio útil para establecer un balance adecuado entre la cantidad de energía que debe entrar y la cantidad de energía que debe salir de un organismo sano. Cuando el profesor les propuso ahondar en las principales transferencias de energía que tienen lugar entre el cuerpo humano y su entorno, todos reconocieron que existe una cesión de energía por trabajo al entorno. Mientras el docente anotaba en la pizarra las ideas que iban surgiendo, los alumnos realizaban sus aportaciones en voz alta sobre el trabajo ejercido por el sistema organismo:

[Benito]: Nos movemos.

[Darío]: ¡Calor tamén!

En cuanto a las absorciones de energía del entorno por parte del cuerpo humano, parecieron sorprenderse de la pregunta, ¡habiendo manifestado previamente la relación entre el valor energético de los alimentos y el balance energético entre el sistema y el entorno! Darío fue el primero en reaccionar, aunque inseguro de su respuesta:

[Darío]: ¿Ó coller osíxeno?

[Ana]: (Haciendo un gesto indicativo de que de repente se acordaba de la idea principal:) Ó comer.

Con la respuesta de Ana, los demás se sintieron más seguros y comenzaron a escribir en sus guiones de trabajo, mientras el profesor dibujaba un pequeño croquis sobre las entradas y salidas de energía del sistema por calor y trabajo. Una vez establecido el modelo de transferencias de energía, animó a los estudiantes a utilizarlo para obtener conclusiones sobre la utilidad de los datos de valor energético. El debate en pequeño grupo se encontró enseguida con una dificultad: ¿Qué valor debe tener el balance energético neto del organismo?

[Darío]: Temos que inxerir menos do queeee...

[Benito]: O mesmo.

A raíz de la afirmación de Benito, las manifestaciones escritas de Ana y Alfonso incorporaron la idea de un "equilibrio entre la energía que entra y la que sale". Benito añadió en su respuesta la variación en la cantidad de masa del sistema

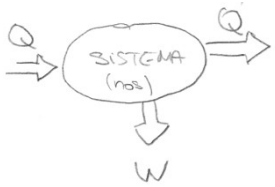
como consecuencia de la alteración de este "equilibrio". Por su parte, Clara se limitó a hacer referencia a la necesidad de controlar la cantidad de "energía ingerida" (a través de los alimentos) sin detallar en qué consiste tal control:

E. ¿Crees que los datos de "contenido energético" de los alimentos nos ayudan a seleccionar los alimentos adecuados para una dieta saludable? ¿Necesitamos alguna información adicional para adecuar nuestra dieta a nuestras necesidades? Justifica tus respuestas.

[Ana (razonamientos similares: Alfonso,]: - Sí, porque nos vale para intentar acadar un equilibrio entre a enerxía que entra en nós a través dos alimentos e a que sae por procesos de enerxía e calor

[Benito]: Sí, porque sabendo as calorías que o noso corpo necesita ó dia, podemos saber se nos pasamos ou se nos quedamos cortos. Ó acabar de crecer, toda a enerxia que consumimos se non a liberamos en forma de traballo ou calor, o noso corpo a almacena e engordamos.

[Clara]: - Sí, porque tendo en conta que somos un sistema, podemos intervir na enerxía, en este caso de calor, que inxerimos



Las manifestaciones de Clara hacen referencia a la intervención consciente y responsable que debe hacer el individuo sobre el balance energético de su organismo. A partir de esta idea, Rodrigo introdujo la necesidad de determinar no solamente la energía que entra en el cuerpo, sino también la que se libera al entorno. Benito y Darío manifestaron que se puede decidir cuánto "trabajo se gasta", y el profesor replicó que es difícil estimar día a día la cantidad de energía que se libera como consecuencia de muchos procesos que son imprescindibles en la actividad biológica: la regulación de la temperatura corporal, las reacciones químicas vitales (como la síntesis de compuestos necesarios para el mantenimiento de las celulas) o los procesos de transporte intracelular y extracelular de iones y otras sustancias.

Ninguno de los alumnos reflejó estas ideas en sus manifestaciones finales.

En cuanto a la selección de otros criterios, distintos del termoquímico, que ayuden a planificar una dieta saludable, Rodrigo esperó un par de minutos a que los alumnos reflexionaran, pero terminó perdiendo la paciencia y cortó el debate en pequeño grupo con una pregunta categórica:

[Profesor]: ¿Qué más hay que mirar que el contenido energético?

[Ana]: Pois proteínas yyy… ¿no?

[Darío]: Pois os outros compostos, que… (Hace con los brazos un gesto de perplejidad.)

De los cinco alumnos que asistieron a clase aquel día, Adela era la única que no estaba matriculada en las asignaturas de Biología y Ciencias de la Tierra y Medioambiente. Sin embargo, solamente una alumna, Ana, mencionó en sus manifestaciones finales que la elección de una dieta equilibrada ha de tener en cuenta las necesidades orgánicas relacionadas con nutrientes básicos para el mantenimiento de un buen estado de salud, aunque no citó las vitaminas, las sales minerales ni el agua:

F. Después de la intervención del profesor, ¿han variado algunas de tus observaciones y de tus explicaciones? Si así ha sido, describe detalladamente cuáles han variado y en qué.

[Ana]: Mediante os alimentos, recibimos enerxía por nun proceso de calor e nós liberamos traballo e enerxía.

$Q + Q' + W = 0$

Ademais da enerxía dos elementos, é necesario inxerir unha cantidade adecuada de glícidos, lípidos ou proteínas.

Alfonso, Benito y Clara dejaron en blanco el apartado correspondiente a la reflexión de las ideas trabajadas en la actividad.

Considerando que dedicar más tiempo al debate en gran grupo no mejoraría sustancialmente los razonamientos, Rodrigo instó a los alumnos a que completaran sus respuestas y fueran concretando las dudas que quisieran consultarle sobre el examen del día siguiente. Los estudiantes copiaron el croquis realizado en la pizarra sobre el balance energético del organismo, y, cuando faltaban cinco minutos para terminar la sesión, se levantaron al unísono, declarando que no tenían dudas y dando la clase por terminada.

En el apartado correspondiente al desarrollo de la actividad *Fp14* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp14: la "entalpía de enlace"*, pág. 678) ya se han comentado las impresiones de Rodrigo sobre los resultados de la sesión: decepción por el rendimiento general, y preocupación por el futuro desempeño de los estudiantes. Manifestó su desencanto porque los escasos conocimientos y la poca voluntad de los alumnos impedían tratar en clase muchos problemas de interés para la vida personal o social, como la planificación de una dieta saludable, y se consoló con la idea de que al menos, al final de la unidad didáctica *Termoquímica* dominaban los conceptos y relaciones más básicas de la Termodinámica y realizaban los cálculos mecánicos que les permitirían enfrentarse con éxito al examen de Selectividad. Se alegraba de que los estudiantes identificaran las transferencias energéticas por calor y trabajo en procesos tan poco "habituales" en las clases tradicionales como el

metabolismo, y de que en actividades precedentes hubieran introducido por propia iniciativa algunas relaciones del dominio microscópico para interpretar los aspectos energéticos de los procesos objeto de estudio.

A su juicio, la mejora en la descripción macroscópica de los balances energéticos y el progresivo afianzamiento de los modelos demostraban que la metodología funcionaba y que el gran esfuerzo realizado estaba valiendo la pena. Predecía que los resultados de la implementación de la primera propuesta didáctica serían dispares, y vaticinó que cinco alumnos obtendrían "buenas notas" en los análisis por esquemas de razonamiento y acción (en el momento de la intervención en el aula, no se había diseñado todavía el análisis del aprendizaje por competencias): Ana, Alfonso, Benito, Adela y Darío. Comentó que "al final" se sentía aliviado de una idea que al principio le había producido cierto miedo: que una metodología como la utilizada, tan exigente desde el punto de vista de las interacciones *inter pares* y con el experto, perjudicara a los "alumnos que más trabajan, pero que menos hablan". Unas pocas sesiones le habían bastado para comprobar que los alumnos menos extrovertidos en los debates en gran grupo eran capaces de participar "sin complejos" en los debates internos y, entre éstos y el desarrollo de las manifestaciones escritas, se mantenían activos en el desarrollo de ideas nuevas. Se mostró satisfecho de la evolución de su intervención, que estaba progresando muy rápidamente y adaptándose con facilidad a regular las dinámicas de debate en pequeño y gran grupo. Consideraba que esta tarea, que era la que más inseguridad le había generado al principio de la intervención, le había costado sorprendentemente poco, y que se había acostumbrado "casi sin querer" a regular los debates de los alumnos, a abrir y cerrar las discusiones con naturalidad y a realizar sin gran esfuerzo lo que fuera del aula valoraba como más difícil: "según la motivación que les vea (a los alumnos), dejarlos un poco más o menos".

III.2.2.16. Descripción del examen tradicional realizado tras la implementación de la unidad didáctica *Termoquímica*

La sesión siguiente a la que se acaba de describir, consistió en la realización del primer examen tradicional de la segunda evaluación de *Química*, y por tanto no tiene que ver con el plan experimental de esta investigación. No se llevó a cabo su registro videográfico ni se realizará un análisis exhaustivo del mismo, pero sí se resumen en este apartado algunos detalles de su desarrollo, por dos motivos:

En primer lugar, los resultados que obtuvieron los alumnos en el examen tradicional de la asignatura reflejan el rendimiento que demostraron en la realización de dos ejercicios mecánicos sobre Termoquímica, diseñados por el docente a imitación de los que figuran habitualmente en las pruebas de Selectividad. Además, las calificaciones obtenidas en los exámenes tradicionales influyen significativamente en los aspectos actitudinales.

El examen tradicional, calificado sobre un máximo de 7,5 puntos, constaba de dos partes:

La primera parte, en la que los alumnos podían obtener un máximo de 5,0 puntos, consistía en cuatro ejercicios de Química Orgánica sobre formulación de compuestos orgánicos, nomenclatura IUPAC, escritura de fórmulas moleculares desarrolladas y representación de estructuras de Lewis. La segunda parte del examen, puntuable hasta 2,5 puntos de los 7,5 totales, tenía dos ejercicios numéricos en los que se pedía a los estudiantes que realizaran varias tareas: que calcularan variaciones de entalpía de distintas reacciones a partir de valores tabulados de ΔH_f, que a partir del valor de la ΔH_c determinaran la masa de combustible que libera una cantidad dada de energía, y que obtuvieran el calor involucrado en una neutralización de NaOH y HCl tomando como referencia los datos experimentales que se ofrecían en el enunciado. A imitación de las pruebas de Selectividad, todas estas tareas consistieron en la aplicación de estrategias de transformación de datos para obtener resultados, sin necesidad de hacer explícita ninguna conclusión ni de tomar decisiones sobre las cuestiones planteadas; no se exigió al alumnado ninguna interpretación de los datos a transformar ni de los resultados obtenidos.

Se recogen en la las calificaciones obtenidas por los alumnos en este examen tradicional, incluyendo los resultados de Química Orgánica y Termoquímica.

Tabla 6: calificaciones obtenidas por los alumnos de la muestra en la realización del primer examen tradicional de la segunda evaluación de Química

GRUPO	ALUMNO	CALIFICACIÓN DEL EXAMEN TRADICIONAL	CALIFICACIÓN DE QUÍMICA ORGÁNICA	CALIFICACIÓN DE TERMOQUÍMICA
Ana y Adela	Ana	5,4 sobre 7,5	4,5 sobre 5,0	0,9 sobre 2,5
	Adela	3,5 sobre 7,5	1,0 sobre 5,0	2,5 sobre 2,5
Alfonso, Carlos y Clara	Alfonso	7,1 sobre 7,5	5,2 sobre 5,0	1,9 sobre 2,5
	Carlos	0,0 sobre 7,5	0,0 sobre 5,0	0,0 sobre 2,5
	Clara	2,5 sobre 7,5	1,7 sobre 5,0	0,8 sobre 2,5
Brais, Benito y Berta	Brais	0,4 sobre 7,5	0,4 sobre 5,0	0,0 sobre 2,5
	Benito	5,6 sobre 7,5	3,1 sobre 5,0	2,5 sobre 2,5
	Berta	0,2 sobre 7,5	0,2 sobre 5,0	0,0 sobre 2,5
Diana, Darío y Débora	Diana	0,0 sobre 7,5	0,0 sobre 5,0	0,0 sobre 2,5
	Darío	4,8 sobre 7,5	2,3 sobre 5,0	2,5 sobre 2,5
	Débora	0,0 sobre 7,5	0,0 sobre 5,0	0,0 sobre 2,5

De los once alumnos que se presentaron al examen, aprobaron cuatro: Ana, Alfonso, Benito y Darío; Adela obtuvo una calificación de suspenso a dos décimas y media del aprobado. Solamente Alfonso alcanzó una calificación de notable. Es significativa la proporción de estudiantes que no llega a la décima parte de la puntuación global: cinco de once alumnos, prácticamente la mitad de la muestra. Estos cinco alumnos de rendimiento prácticamente nulo en el examen tradicional son los que también demuestran poco aprendizaje y poco interés en mejorar sus

conocimientos a lo largo de la implementación de la metodología ensayada en la presente investigación: Carlos, Berta, Brais, Diana y Débora. Todos ellos obtuvieron 0,0 puntos sobre los 2,5 puntos máximos de la parte de Termoquímica, y prácticamente la misma calificación en la parte de Química Orgánica.

Las puntuaciones de la parte de Química Orgánica reflejan en general la misma pauta que las globales, con la salvedad de que los resultados de Ana en esta parte son bastante superiores a los de su calificación global. Las puntuaciones de Termoquímica sí se diferencian sustancialmente de las globales en cinco alumnos que superan la calificación de 3,0 puntos sobre el total de 7,5 puntos:

Benito, Adela y Darío alcanzaron la puntuación máxima en la parte de Termoquímica; sin embargo, Adela suspendió el examen, porque en la parte de Química Orgánica obtuvo solamente la quinta parte de la puntuación máxima. Sin embargo Alfonso, el de mayor calificación global, no alcanzó la máxima puntuación en Termoquímica. También llama la atención que Ana suspendiera los ejercicios de Termoquímica, habiendo alcanzado buen rendimiento en los de Química Orgánica.

Un observador que solamente dispusiera de los resultados del examen tradicional, sin conocer previamente a los alumnos ni tener acceso a los datos de la fase previa de la investigación, podría extraer las siguientes conclusiones:

Puesto que un alumno con esquemas de razonamiento y acción acordes con los de la ciencia escolar demuestra conocimientos suficientes como para resolver con éxito muchos problemas científicos sobre Termoquímica, es de esperar que no tenga mayores dificultades en realizar unos ejercicios mecánicos que consisten en una transformación de datos numéricos como la que podría presentarse en la resolución de un problema de base científica; también un alumno con pocos conocimientos científicos puede obtener buen rendimiento en los ejercicios del examen tradicional, si se entrena lo suficiente en las destrezas relacionadas con la aplicación de las normas IUPAC de nomenclatura y formulación de compuestos orgánicos y con el desarrollo de cálculos aritméticos sobre las magnitudes termodinámicas.

En cuanto a Alfonso, el observador no podría determinar si este alumno se habría adiestrado con éxito en todas las destrezas y normas requeridas para obtener un buen rendimiento en los ejercicios del examen, o si tendría unos esquemas de razonamiento y acción útiles y unos niveles de competencia avanzados en los conocimientos de Química Orgánica y Termoquímica, lo que le permitiría realizar las tareas mecánicas propuestas en la prueba escrita y también resolver problemas de base científica.

Tampoco en el caso de Adela, Benito y Darío, los tres alumnos de menor calificación global, pero que obtienen la máxima puntuación en la parte de Termoquímica, el observador dispondría de suficientes datos como para extraer conclusiones fiables. Podría interpretar que Benito y Darío, de rendimiento

aceptable en la parte de Química Orgánica, presentan al menos un nivel de adiestramiento aceptable, independientemente de que tengan mayores o menores conocimientos significativos de los marcos conceptual y procedimental. En cuanto a Adela, se trata de una alumna de rendimiento máximo en ejercicios numéricos como los de Termoquímica, que obtiene solamente la quinta parte de la puntuación máxima en los ejercicios relacionados con la formulación y nomenclatura de compuestos orgánicos. El observador que no dispusiera de información sobre el cambio metodológico, que ayudó a Adela a mejorar sus esquemas de razonamiento y acción y sus competencias a lo largo de la implementación de la unidad didáctica *Termoquímica*, probablemente manejase dos hipótesis: o bien Adela tendría buenos esquemas de razonamiento y acción y competencias avanzadas, pero no conocería suficientemente las normas IUPAC de nomenclatura y formulación de compuestos orgánicos, o bien no tendría esquemas de razonamiento y acción adecuados ni competencias científicas a un nivel como para resolver problemas, pero sí se habría adiestrado lo suficiente en la aplicación de algoritmos para transformar datos termoquímicos, no en la nomenclatura y formulación de compuestos orgánicos.

Un razonamiento similar, cambiando la Química Orgánica por la Termoquímica, explicaría el sobresaliente rendimiento de Ana en los ejercicios de Química Orgánica y el escaso rendimiento en Termoquímica.

Los malos resultados de Clara en las dos partes del examen hacen pensar que esta alumna tendría unos esquemas de razonamiento y acción bastante incompletos y unos bajos niveles de competencia científica, y que se habría adiestrado insuficientemente como para llegar a rendir en la aplicación de las normas IUPAC y en los métodos de cálculo relacionados con la manipulación aritmética de las variables termoquímicas. También es plausible la hipótesis de que los cinco alumnos de rendimiento casi nulo en los dos temas de examen tienen muy pocos conocimientos científicos. Dado el poco empeño que ponen en adiestrar ciertas destrezas para obtener un rendimiento aceptable en el examen tradicional, el observador podría predecir que las dificultades de aprendizaje de estos estudiantes están más relacionadas con obstáculos de índole actitudinal que con la falta de comprensión de los conceptos y procedimientos relacionados con la Termoquímica o la Química Orgánica.

Comentados los resultados del examen tradicional, se resumen las implicaciones que tuvieron estas calificaciones sobre los resultados que se obtendrían en la caracterización inicial de la muestra y, sobre todo, en el posterior desarrollo de la fase de intervención, en la que se implementó la unidad didáctica sobre Termodinámica Química:

El martes siguiente al examen tradicional, tuvo lugar la caracterización inicial de la muestra, a la que asistieron todos salvo Débora. Al final de la clase, el docente informó a los alumnos de las calificaciones que obtuvieron en el examen.

Las noticias sorprendieron desagradablemente a los alumnos suspensos, y en especial a Berta, que de inmediato manifestó que se negaba a aceptar su calificación, argumentando que se había esforzado mucho durante las prácticas de calorimetría y que había entregado unos informes impecables. Tan impecables eran, contraargumentó el profesor, que los había extraído casi intactos de la página *web* oficial de la Comisión Interuniversitaria de Galicia. A esto, Berta se limitó a encogerse de hombros y rezongar que a ella le costaba mucho la Química y ponía mucho esfuerzo en estudiarla, y que si no veía recompensado este esfuerzo con buenas calificaciones, no le "cundía" seguir dedicándole tiempo a la asignatura. A los consejos de Rodrigo solamente respondió "es igual, es igual", dando a entender que abandonaba todo intento futuro de avanzar en el aprendizaje de la Química. También Brais se mostraba enfadado por su calificación, Clara parecía estar triste y desanimada, e Carlos indiferente. Las actitudes negativas hacia el aprendizaje de la asignatura y el trabajo realizado en el aula se mantuvieron en el tiempo hasta el extremo de que el nivel de asistencia a las sesiones de clase bajó drásticamente en Berta, Diana y Débora (Carlos mantendría sus continuos retrasos en la hora de llegada); Brais tendió a negarse a realizar las actividades. El análisis de los datos que se recogerían en lo sucesivo de estos alumnos, muestra que las deficiencias en el aprendizaje de Brais, Carlos, Berta, Diana y Débora tienen como causa primaria las actitudes negativas (***Capítulo VIII***). Considerando además los resultados de las evaluaciones tradicionales de las demás asignaturas y los niveles de asistencia a éstas, que se obtuvieron de las entrevistas realizadas a los docentes, a los propios alumnos y sus padres, podemos afirmar que esta actitud negativa se extiende más allá del aprendizaje de la Química y las Ciencias, y afecta al desarrollo de todos los conocimientos escolares en general.

III.3. Análisis y discusión de los resultados

Los resultados obtenidos se han descrito e interpretado mediante dos tipos de análisis cualitativo: un *Análisis mediante esquemas de conocimiento* (pág. 714), en el que se indaga en los esquemas de razonamiento y acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos que experimentan los sistemas materiales, y un *Análisis mediante competencias* (pág. 823), en el que se determinan las competencias que desarrollaron los alumnos a medida que resolvieron las situaciones problemáticas planteadas en las quince actividades de la secuencia didáctica *Termoquímica*. Tanto los esquemas de razonamiento y acción como las competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas en las respuestas a las actividades de la secuencia sobre Termoquímica, y se ilustran con manifestaciones orales y escritas representativas de los estudiantes.

III.3.1. Análisis mediante esquemas de conocimiento

En este apartado se analizan y discuten los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los alumnos a lo largo de la fase previa de la investigación (implementación de la unidad *Termoquímica*). Se elaboraron cinco esquemas de razonamiento: ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***) y cuatro esquemas de acción (las destrezas en ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***), como se describe en el ***Volumen A***.

De las manifestaciones orales y escritas que produjeron los estudiantes, se han extraído las relaciones que constituyen esquemas de razonamiento y acción, y, para identificar regularidades en los esquemas, se han elaborado las tablas de frecuencia de activación, como la *Tabla 7* (pág. 716). En ellas se recogen, para cada individuo, las relaciones pertenecientes a cada esquema, asociadas a la activación que se generó mediante las actividades de *Termoquímica*.

A lo largo de los dos apartados siguientes se describen e interpretan los esquemas de razonamiento (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento* ***ER1***, *…*, ***ER5***, pág. 715) y de acción (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción* ***EA1***, *…*, ***EA4***, pág. 781) idiosincrásicos de los alumnos, ordenados en función del esquema del que forman parte y de la complejidad de la estructura esquemática. Dentro de cada apartado dedicado a un esquema, a su vez hay dos: uno titulado *esquemas idiosincrásicos de los alumnos*, en el que se describen e interpretan las tablas de datos, y antes de este apartado, una introducción que lleva el nombre *análisis general de los resultados*. En ella se detalla con qué frecuencia se activaron relaciones acordes con la ciencia escolar para las dimensiones establecidas, a medida que con la intervención se produjo una paulatina desaparición de las relaciones alternativas que se manifestaron en las primeras actividades; se observa también una tendencia progresiva hacia el crecimiento de los esquemas, mediante la activación de nuevas relaciones adecuadas que construyen significados deseables para los conocimientos científicos (conceptos, modelos, destrezas y estrategias) que fueron objeto de aprendizaje en la secuencia didáctica *Termoquímica*.

III.3.1.1. Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento *ER1*, …, *ER5*

Los apartados que vienen a continuación son cinco, cada uno dedicado a la descripción de un esquema de razonamiento que activaron los alumnos de la muestra a lo largo de la unidad didáctica sobre Termoquímica:

ER1 (*Esquema* ***ER1****: Sistemas termodinámicos*, pág. 716), ***ER2*** (*Esquema* ***ER2****:*

Procesos termodinámicos, pág. 731), ***ER3*** (*Esquema* ***ER3****: Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*, pág. 747), ***ER4*** (*Esquema* ***ER4****: Dinámica de los procesos químicos*, pág. 762) y ***ER5*** (*Esquema* ***ER5****: Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*, pág. 772).

Esquema *ER1: Sistemas termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER1*** (***Sistemas termodinámicos***) que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 7* recoge las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación, esto es, el número de veces que los alumnos hicieron explícita cada relación en sus respuestas a las tareas de *Termoquímica*. El valor de la frecuencia *f* de una determinada relación es un estimador de la consistencia de dicha relación en el conjunto de la muestra. En la última columna de la *Tabla 7* se listan los códigos (***Cód***) que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, representadas por el símbolo ***S***.

El esquema referencial de razonamiento ***sistemas termodinámicos*** se compone de 59 relaciones, y los estudiantes activaron adecuadamente 51 de ellas. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren al reconocimiento del sistema termodinámico y su entorno, y a la determinación de los estados termodinámicos utilizando las siguientes magnitudes: cantidad de energía, estados de agregación, composición química, temperatura, energía interna y entalpía. De las 8 relaciones del esquema referencial que no se activaron, 5 se refieren a la descripción de los sistemas utilizando conceptos relacionados con las variables termodinámicas de entropía y energía de Gibbs, además de la relación que da significado a los microestados de energía; el resultado que se esperaba para estas relaciones en la fase previa es precisamente la no activación. Las otras 3 relaciones no activadas están relacionadas con la naturaleza intensiva de las magnitudes termodinámicas básicas temperatura y presión. Las relaciones ***S16*** y ***S17***, sobre la definición de los sistemas aislados, solamente fueron utilizadas por dos alumnas en una de las actividades (*Fp03*); pero dado que en *Termoquímica* no se trabaja con ningún sistema aislado, la no activación de estas relaciones no supone una gran pérdida en información en la descripción y la interpretación de las características de los sistemas termodinámicos.

Tabla 7: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Sistemas termodinámicos*** *(****ER1****), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód

UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	141	***S01***
UNIVERSO consta de ENTORNO	139	***S02***
SISTEMA tiene MATERIA	130	***S03***
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	19	***S04***
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	26	***S05***
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	127	***S06***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	128	***S07***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	26	***S08***
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	139	***S09***
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	93	***S10***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	10	***S11***
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	10	***S12***
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	9	***S13***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	58	***S14***
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	54	***S15***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	2	***S16***
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	2	***S17***
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	48	***S18***
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	135	***S19***
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	***S20***
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	131	***S21***
FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	13	***S22***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	106	***S23***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	19	***S24***
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	88	***S25***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	81	***S26***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	65	***S27***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	10	***S28***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	12	***S29***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	106	***S30***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	102	***S31***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	12	***S32***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	84	***S33***
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	84	***S34***
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	79	***S35***
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	35	***S36***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	12	***S37***
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	84	***S38***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	0	***S39***
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	62	***S40***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	83	***S41***
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	0	***S42***
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	16	***S43***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	67	***S44***
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	0	***S45***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	66	***S46***
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	12	***S47***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	121	***S48***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	91	***S49***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	52	***S50***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	106	***S51***
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	21	***S52***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	89	***S53***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	0	***S54***
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	0	***S55***
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	0	***S56***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	0	***S57***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	84	***S58***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	69	***S59***

Del total de 59 relaciones que componen el esquema referencial ***ER1***, 42 se encuadran en el dominio macroscópico de representación del conocimiento, y 17 tienen relación con el dominio microscópico. Aunque las relaciones microscópicas no forman parte del *corpus* teórico de la Termodinámica Clásica, las incluimos en

ER1 porque su activación es un buen indicador de la profundidad interpretativa alcanzada en la descripción de los estados termodinámicos de los sistemas materiales. Analizando las respuestas, se observa que los estudiantes activaron las 17 relaciones microscópicas de ***ER1*** a lo largo de la fase previa, con una frecuencia de activación de relaciones microscópicas $f_{(micro)} = 757$ y un promedio de activación elevado, puesto que la media aritmética de frecuencias es $\bar{x}_{(micro)} = 45$, con desviación típica $\sigma_{(micro)} = 39$. Las relaciones macroscópicas tienen un valor de $f_{(macro)} = 2601$, con un promedio de activación $\bar{x}_{(macro)} = 62$ y $\sigma_{(macro)} = 50$.

Estos datos estadísticos indican que los alumnos construyeron descripciones e interpretaciones eminentemente macroscópicas para resolver las cuestiones planteadas en las actividades de la fase previa, como es de esperar en el desarrollo de una unidad didáctica sobre Termoquímica. Pero el elevado valor de $f_{(micro)}$ indica una cierta tendencia a la activación de las relaciones microscópicas que permiten interpretar los sistemas sobre la base de su composición química. No deben pasarse por alto los elevados valores de desviación estadística $\sigma_{(macro)}$ y $\sigma_{(micro)}$: los resultados reflejan una activación significativamente desigual de las distintas relaciones de ***ER1***, lo que también es esperable si tenemos en cuenta que algunas de ellas siguen siendo desconocidas para los estudiantes después de la implementación de *Termoquímica*.

De las 59 relaciones del esquema referencial ***Sistemas termodinámicos***, 16 eran ya familiares para los alumnos, por haberlas trabajado en cursos anteriores. Recuérdese que para establecer los valores del factor ***Novedad*** de las competencias (ver ***Volumen A***), la investigadora consultó con Rodrigo, el profesor que había impartido *Física y Química* a este grupo de alumnos en los cursos de 3º y 4º de ESO; los únicos estudiantes que nunca habían tenido clase con Rodrigo antes de 2º de Bachillerato eran los procedentes del C.P.I. *San Sadurniño*: Brais, Clara y Darío, que habían ingresado en el centro en 1º de Bachillerato.

Al comparar las frecuencias de activación y sus correspondientes promedios para las 16 relaciones ya conocidas y las 43 relaciones nuevas, se obtienen promedios de activación bastante dispares: $f_{(no\ nuevas)} = 972$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 61$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 45$, frente a $f_{(nuevas)} = 2386$, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)} = 55$, y $\sigma_{(nuevas)} = 48$. De estos datos se deduce que los estudiantes no rechazaron la utilización de las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones, antes bien, las utilizaron en sus respuestas con un promedio de frecuencia de activación casi equiparable al de las relaciones conocidas. Teniendo en cuenta que la construcción de las relaciones nuevas se realiza sobre la estructura de las ya trabajadas en cursos anteriores, la poca diferencia entre los promedios de las frecuencias de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ y $\bar{x}_{(nuevas)}$ es un buen punto de partida para alcanzar un aprendizaje significativo.

En la *Tabla 8* (pág. 720) se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Sistemas termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*. Los datos de la tabla se han organizado en las cinco columnas que se describen a continuación:

En la primera columna se listan las quince actividades de la secuencia.

Las columnas de la segunda a la cuarta establecen tres magnitudes que sirven como indicadores de la capacidad de las actividades para activar relaciones del esquema de razonamiento ***ER1***. La segunda columna recoge las frecuencias de activación *f* correspondientes a cada actividad, que indican la capacidad de las actividades de *Termoquímica* para incentivar la activación de relaciones de un esquema dado (las *f* de la *Tabla 7* (pág. 716) cuantifican la activación en el conjunto de la fase previa). En la segunda columna de la *Tabla 8* (pág. 720) se muestra el número de alumnos A = (0,1,…,11) que activaron al menos una relación correspondiente al esquema de razonamiento ***ER1***. El valor de A da una idea de la mayor o menor idoneidad de cada actividad para conseguir que distintos individuos activen relaciones de ***sistemas termodinámicos***. La tercera columna de la *Tabla 8* (pág. 720) contiene el número R de relaciones de ***ER1*** que se activaron con la actividad, siendo R = (0,1,…,59). Cuanto mayor es el valor de R, más útil es la actividad para que los estudiantes utilicen un gran número de relaciones.

Con los indicadores *f*, A y R se puede analizar la activación de relaciones del esquema en función de las actividades realizadas: el valor de *f* estima hasta qué punto una actividad logra que los alumnos utilicen relaciones del mismo, y el análisis conjunto de A y R permite indagar en las causas que subyacen a los resultados de *f*, al indicar cuántos estudiantes activaron relaciones y cuántas de las relaciones del esquema referencial se llegaron a utilizar. Un alto valor de *f* se relaciona con A y R elevados, y un bajo valor de *f* con bajos valores de A y R, pero un valor intermedio en *f* se puede relacionar con un valor alto de A y uno bajo de R, o uno bajo de A y uno alto de R, y responden a situaciones diferentes:

La primera combinación (*f* intermedio, A alto y R bajo) indicaría que un gran número de alumnos habrían activado relaciones de ***ER1***, siendo pequeño el número de relaciones activadas; de ello se podría deducir que la actividad habría tenido éxito en la activación de unas pocas relaciones de ***Sistemas termodinámicos***. Bajos valores de *f* y A, unidos a un alto valor de R, revelan que son pocos los alumnos que activan ***ER1***, pero conectan un gran número de relaciones en sus esquemas; entonces, la actividad habría sido capaz de promover la utilización de ***ER1*** en sólo una parte de la muestra, y las causas de la activación de pocas relaciones por parte de la otra fracción de alumnos deben determinarse caso por caso.

Para profundizar en el análisis de las distintas situaciones de aprendizaje, en la quinta y última columna de la *Tabla 8* se exponen, entre paréntesis y separados por una coma, los números mínimo y máximo de relaciones activadas en cada

actividad. Por ejemplo, una dupla ***(mín,máx)*** = (0,59) indicaría que el alumno de la muestra que menos relaciones de ***ER1*** activó en la actividad correspondiente, no utilizó ninguna, y el que más activó, utilizó las 59. Las duplas ***(mín,máx)*** son un estimador de la dispersión de los datos, porque la amplitud del intervalo que cubren indica la mayor o menor disparidad en la activación de relaciones de los esquemas de razonamiento y acción por parte de los individuos de la muestra.

Tabla 8: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos (ER1)*** *en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	173	11	24	(11,19)
Fp02	*187*	*11*	*17*	*(17,17)*
Fp03	266	11	37	(17,34)
Fp04	209	11	30	(9,23)
Fp05	318	10	32	(0,33)
Fp06	*264*	*11*	*24*	*(24,24)*
Fp07	243	11	30	(9,28)
Fp08	282	10	30	(28,30)
Fp09	246	10	32	(8,32)
Fp10	*198*	*6*	*34*	*(34,34)*
Fp11	*156*	*6*	*27*	*(27,27)*
Fp12	196	10	30	(17,29)
Fp13	244	10	26	(25,26)
Fp14	241	10	31	(18,31)
Fp15	73	4	23	(0,20)

Obsérvese que el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termoquímica* varió a lo largo de la fase previa: 11 se presentaron a las actividades *Fp01–Fp07*, y 10 a las demás, con la excepción de *Fp10* y *Fp11*, implementadas el día anterior al festival de Carnaval, y *Fp15*, cuyo desarrollo coincidió con una huelga estudiantil contra el plan Bolonia y en víspera del examen tradicional de la asignatura; la asistencia a estas actividades se limitó a 5-6 alumnos de los 11 matriculados en *Química*. Los valores de *A* que recoge la muestran que hay dos actividades en las que un alumno se negó en redondo a trabajar y no utilizó ninguna relación de sus esquemas de razonamiento y acción (Diana en *Fp05* y Brais en *Fp15*). En las 13 actividades restantes, todos los que realizaron las tareas propuestas activaron relaciones de ***ER1***; el valor de *A* cae de 11 a 10 a partir del desarrollo de *Fp08* porque la muestra se vio reducida en un individuo por las continuas faltas de asistencia de Débora.

Se resaltan en bastardilla los datos correspondientes a las actividades de indagación/reestructuración *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11*. Dado que en ellas los estudiantes no realizan manifestaciones escritas de las que se puedan vaciar las relaciones activadas, no se dispone de datos fiables. En consecuencia, se asigna como número de relaciones utilizadas por el alumnado, el número de las relaciones de ***ER1*** que se trabajan en el texto de la actividad, aunque estos datos no se utilizan para elaborar los esquemas idiosincrásicos de los alumnos si el análisis de las demás

actividades no confirma con seguridad la validez de la asignación; la reconstrucción ficticia de las relaciones que pudieron haber activado los alumnos en las actividades de indagación/reestructuración tiene por objetivo estimar la idoneidad de éstas para trabajar en el aula con las relaciones del esquema ***Sistemas termodinámicos***, comparando sus datos con los de las actividades de exploración que las anteceden y de aplicación que las suceden, de las cuales sí se dispone de valores de activación.

Al comparar los valores de *f*, *R* y *(mín,máx)* que se han adjudicado a las actividades de indagación/reestructuración *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11*, y los valores obtenidos en las actividades de exploración y de aplicación correspondientes, se observa que los valores de *f* y *R* correspondientes a *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11* no son discordantes con respecto a los de sus respectivas actividades anteriores y posteriores. De hecho, en las actividades de aplicación, los alumnos activan un número igual o superior de relaciones de ***ER1*** que el que se ha adjudicado a las actividades de indagación inmediatamente anteriores, exceptuando el caso de *Fp06*, a cuyo desarrollo inicial faltaron tres alumnos, Alfonso, Diana y Débora, que solamente asistieron al repaso de la sesión siguiente. Por lo tanto, se puede suponer que todos los alumnos que realizaron una actividad de indagación activaron todas (o prácticamente todas) las relaciones de ***ER1*** que se trataban. En cuanto a los valores de las duplas *(mín,máx)*, los máximos obtenidos por estimación para *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11* no son sustancialmente diferentes de los correspondientes a las actividades de aplicación siguientes, mientras que en los valores mínimos sí hay una notable diferencia. De estos datos se deduce que algunos de los alumnos lograron una buena activación de relaciones del esquema ***ER1*** en las actividades de indagación, mientras que otros debieron de activar bastantes menos relaciones.

Según los indicadores *f* y *R*, las actividades que condujeron a una mayor utilización de relaciones de ***Sistemas termodinámicos*** son *Fp03*, *Fp05* y *Fp08*. La dispersión de los datos es casi nula en *Fp08* y en *Fp13*: la dupla *(mín,máx)* indica que entre el alumno que más activó, y el que menos, existe una diferencia de una o dos relaciones. En ambas actividades coincide el valor de *R* con el máximo de la dupla *(mín,máx)*. En el caso de *Fp13*, muy parecida a *Fp12*, el número máximo de relaciones activadas baja en 3 unidades, pero el mínimo sube en 8, lo que indica que *Fp13* fue útil en la consolidación de las relaciones de ***ER1*** trabajadas en *Fp12*. Una lectura parecida se hace de los datos de *Fp08* con relación a los de *Fp07*: la realización de *Fp08* ayudó a los alumnos a poner en práctica las relaciones trabajadas en *Fp07*, y con mayor éxito, teniendo en cuenta la reducción que se observa de *Fp07* a *Fp08* en la dispersión de activación que indica la dupla *(mín,máx)*.

La actividad que menos relaciones ayudó a activar fue, con diferencia sobre las demás, *Fp15*. A ella solamente asistieron 5 alumnos, de los cuales uno no activó ninguna relación (de ahí que $A = 4$). El valor $R = 23$ señala que el número total de relaciones activadas es poco inferior al de otras actividades. Si se considera además

la dupla *(mín,máx)* = (0,20), se deduce que *Fp15* promovió una activación muy irregular de las relaciones de ***ER1***. A la vista de los esquemas del alumnado es evidente que la irregularidad de resultados de *Fp15* se debe más a problemas actitudinales que a dificultades con lo conceptual o lo procedimental.

Las actividades de mayor dispersión en la activación de relaciones son, además de la citada *Fp15*, otras cuatro: *Fp01*, *Fp04*, *Fp07* y *Fp09*. Las tres primeras son conceptual y procedimentalmente demandantes, y se plantearon cuando los alumnos llevaban poco tiempo trabajando con la nueva metodología. Dado que los obstáculos actitudinales al aprendizaje comenzarían a hacerse patentes en *Fp08*, la dispersión en la activación de relaciones en *Fp01*, *Fp04* y *Fp07* puede atribuirse a problemas de tipo conceptual y procedimental. Por el contrario, *Fp09* no es tan demandante, y es muy similar a *Fp08* en temática, planificación y desarrollo. Al comparar los datos de *Fp08* y *Fp09* se observa una dicotomización de la muestra: algunos alumnos activan más relaciones en *Fp08* que en *Fp09*, mientras que otros pasan a activar menos. Teniendo en cuenta las similitudes entre ambas actividades y el hecho de que ambas se implementaron en la misma sesión, la elevada dispersión de los resultados en *Fp09* se debe a obstáculos de tipo actitudinal más que a problemas con los aspectos conceptuales o procedimentales.

En el siguiente apartado se discuten estas cuestiones sobre la base de los esquemas idiosincrásicos de los alumnos.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Sistemas termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos de los alumnos. En ellos, las variables y los subesquemas se representan mediante etiquetas, unidas por nexos de línea continua que simbolizan las relaciones adecuadas (de la ciencia escolar). Los elementos y las relaciones representativas de la ciencia escolar que no se activan, se muestran de color gris, y los elementos y relaciones alternativas se ilustran con líneas punteadas y letra cursiva.

Los esquemas se han categorizado en diferentes niveles y subniveles, que se recogen en la *Tabla 9* (pág. 723). En ella, las relaciones activadas acordes con la ciencia escolar se señalan con el símbolo ✓, las inadecuadas, con un ✗, y las no activadas, con un guion (-). El símbolo 💣 distingue aquellas relaciones que se activaron inadecuadamente al principio de la fase previa y pasaron a activarse conforme a las ideas científicas a medida que se realizaban más actividades. En realidad, estas relaciones podrían haberse marcado con el símbolo de relación activada (✓), porque el resultado que se observa al final de la fase previa es que el alumno habría demostrado utilizarlas adecuadamente. La utilidad de 💣 es informar al lector de que las relaciones señaladas eran alternativas en un principio, pero evolucionaron progresivamente a lo largo del proceso de aprendizaje hacia la ciencia escolar. Todas las tablas análogas a ésta siguen la misma clave de símbolos.

Para categorizar los esquemas de los alumnos en niveles y subniveles, se han analizado las diferencias que existen entre los distintos esquemas idiosincrásicos y el referencial representativo de la ciencia escolar, tanto en las relaciones establecidas entre los diferentes elementos del esquema, como en los valores atribuidos a los subesquemas y variables. La existencia de diferencias significativas entre distintas estructuras de pensamiento (en este caso, razonamiento), justifica la clasificación de los esquemas en diferentes niveles de ordenación. Los niveles en los que se encuadran los esquemas correspondientes a la fase previa se denominan niveles *p* (p_1, p_2, …, siendo p_1 el esquema más alejado del referencial de la ciencia escolar). Su división en subniveles sirve para señalar la existencia de estructuras similares, pero diferentes, dentro del mismo nivel de ordenación de esquemas. Los subniveles que aparecen en la fase previa están rotulados como p_{1a}, p_{1b}, …; p_{2a}, p_{2b}, …; siendo los subniveles *a* los más alejados del referencial dentro de cada nivel.

La ordenación de los esquemas idiosincrásicos en niveles y subniveles sirve para estudiar de manera cualitativa la evolución que se produjo en el aprendizaje de cada individuo de la muestra y para cuantificar esta evolución, analizando las diferencias existentes entre los momentos anterior y posteriores (*post-test* y retención) a la aplicación de la propuesta didáctica *Termodinámica Química*.

En la clasificación de los 11 esquemas idiosincrásicos de la fase previa, se han establecido cuatro niveles de ordenación, de p_1 a p_4, en orden de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar. Los niveles p_2 y p_3 están subdivididos en tres subniveles cada uno, y el nivel p_1, en dos subniveles:

Tabla 9: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER1***, ***Sistemas termodinámicos****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_4			p_3			p_2			p_1	
	p_{3c}	p_{3b}	p_{3a}	p_{2c}	p_{2b}	p_{2a}	p_{1b}	p_{1a}
ALUMNOS	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Mª D.**	**Alfonso**	**Ana**	**Berta**	**Benito**	**Débora**	**Brais**	**Carlos**
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣
UNIVERSO consta de ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SISTEMA tiene MATERIA	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	✓	✓	✓	✖
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	✓	✓	✓	✖
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	✓	✓	✓	✖
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	💣	✓	💣
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	✓	✓	·	·	·	·
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	✓	✓	·	·	·	·
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✖	✓	✓	✓
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	✓	✓	✓	·	✓	✓	·	✓	✓	✓	·
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	✓	·
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	💣	💣	✓	💣	💣	💣	✓	✓	✖	✓	✓
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	💣	💣	💣	✓	💣	✓	✓	💣	💣	✖	✖
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓
VAR. EXTENS. dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓	💣
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

A continuación se describen los esquemas ***ER1*** prototípicos de cada nivel de ordenación, y se comentan las características que explican su categorización en los niveles $\boldsymbol{ER1}_{Fp} = [p_1,\ldots,p_4]$.

Nivel $ER1_{Fp}$ = p_4: esquemas *ER1* de Mª P, Clara y Darío

En este nivel se categorizan los tres esquemas de razonamiento más cercanos al referencial de la ciencia escolar.

Mª P, Clara y Darío activaron todos los elementos (subesquemas y variables) relevantes para la resolución de las cuestiones planteadas, con dos excepciones:

No activaron el valor *sistema aislado*, pero esto no implica un menor potencial en los razonamientos alcanzados, porque en las actividades de la fase previa no se trabaja explícitamente con sistemas aislados; además, la relación que introduce el valor *sistema aislado* es clasificativa, y estos alumnos utilizaron adecuadamente los otros dos valores posibles de la clasificación (*sistema abierto* y *sistema cerrado*). La no activación de las variables *microestados de energía*, *probabilidad*, *entropía* y *energía de Gibbs*, así como del subesquema ***desorden termodinámico***, es el resultado esperable en *Termoquímica*, porque todavía no se ha trabajado con estos conceptos.

El otro elemento cuyo significado no desarrollaron plenamente es el valor *variables intensivas*. Hicieron explícito que se trata de variables independientes de la *cantidad de materia* del sistema, e identificaron que las ***magnitudes termodinámicas principales*** *energía interna* y *entalpía* tienen carácter extensivo pero se pueden formular como *variables intensivas*. Sin embargo, no aludieron a la naturaleza intensiva de las ***magnitudes termodinámicas básicas*** *presión* y *temperatura*, aunque sí las relacionaron adecuadamente con la composición del sistema. Reconocieron la definición de la temperatura como *temperatura absoluta*, de la que dependen las ***variables termodinámicas principales***.

Los tres alumnos del nivel p_4 identificaron el ***sistema termodinámico*** como parte del ***universo*** en contacto con un ***entorno*** que le impone unas ***condiciones***, y caracterizaron adecuadamente los sistemas utilizando todas las ***funciones de estado*** que se esperaba que utilizaran. Hicieron útil la clasificación de los sistemas en función de sus interacciones con el entorno (con la adjudicación de los valores *sistemas abiertos* y *sistemas cerrados*) y reconocieron la *composición en fases* y la *composición química* como propiedades de los sistemas que definen el ***estado termodinámico*** (***funciones de estado***).

Diana, Clara y Darío tuvieron algunas dificultades para construir las relaciones de ***ER1*** a lo largo de la fase previa:

Los tres pensaban, al principio, que la cantidad de materia puede variar durante los procesos químicos. Clara y Diana consideraban que las variables termodinámicas principales no dependen de la composición del sistema, y Darío tuvo que enfrentarse a algunos obstáculos para visualizar la estructura corpuscular de los sistemas materiales. En sus manifestaciones finales correspondientes a *Fp04* describió el que el proceso de trabajo generado en el funcionamiento del motor perpetuo de primera especie se debe a la formación ¡de una molécula!:

[Darío, Fp04(x)]: (…) Este traballo xerase ao formarse unha molecula de H_2O a partir de O_2 e H_2.

Nivel $ER1_{Fp} = p_3$: subniveles $ER1_{Fp} = p_{3c}$, $ER1_{Fp} = p_{3b}$ y $ER1_{Fp} = p_{3a}$

Este nivel, en el cual se incluyen los esquemas de tres de los once alumnos de la muestra, comprende tres subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{3c}, p_{3b} y p_{3a}. Cada uno de ellos contiene el esquema de razonamiento de un estudiante:

Subnivel $ER1_{Fp} = p_{3c}$: esquema ***ER1*** de Berta

Esta alumna activó casi todos los elementos relevantes para resolver las cuestiones planteadas, a excepción de los valores que tampoco utilizaron los alumnos del nivel p_4, y de la relación ***S28***, por la que se asignael valor *sistemas heterogéneos* a los sistemas en función de la *composición en fases* que tenga el sistema en un estado termodinámico dado. Sin embargo, sí reconoció el estado final del sistema de la actividad *Fp03* como unha "disolución homoxénea".

En cuanto a las dificultades que tuvo para construir las ideas de la ciencia escolar, al igual que Darío y Débora, tardó en consolidar un modelo de partículas sencillo. Al comienzo de la fase previa, reconocía las ***partículas*** como constituyentes del ***sistema termodinámico***, pero les atribuía propiedades macroscópicas, como la capacidad de dilatarse al ser sometidas a altas temperaturas:

[Berta, Fp01(x)]: porque o aplicarlle calor ó mesmo a Tª diminue e a densidade tamén por dilatación das particulas.

Subnivel $ER1_{Fp} = p_{3b}$: esquema ***ER1*** de Alfonso

El esquema de razonamiento de Alfonso es muy parecido a los de los alumnos del nivel p_4, pero este alumno no venció en la fase previa las dificultades para construir un modelo adecuado para los *estados de agregación condensados* y, en particular, el estado líquido, al que atribuye características diferentes según lo compare con los estados gaseoso o sólido. Esta idea alternativa reaparecería con fuerza durante la fase de intervención (***Capítulo V***), cuando se profundizó en los modelos de estructura corpuscular de la materia para analizar los cambios de desorden termodinámico que suceden en los sistemas como consecuencia de los procesos físicos y químicos.

Al principio de la unidad didáctica, Alfonso tuvo algunas dificultades relacionadas con la cantidad de materia de los sistemas termodinámicos, que después superó: conceptualizar que los sistemas cerrados intercambian energía con el entorno, que la cantidad de materia permanece constante durante los procesos químicos y que el número de mol y la masa son indicadores de la cantidad de materia del sistema y, por tanto, tienen carácter extensivo.

Finalizada la fase previa, Alfonso utilizaba el lenguaje científico para expresar los constructos que tienen que ver con la definición, caracterización e interpretación de los estados termodinámicos. Pero llama la atención lo pobre que es su expresión escrita y oral para un alumno de su edad y nivel educativo. En sus manifestaciones hay una gran cantidad de faltas de concordancia entre sujeto y predicado, y abundan los anacolutos, las aserciones tautológicas y las incoherencias. En las entrevistas, los docentes afirmaron que Alfonso descuidaba la expresión de sus ideas en todas las asignaturas, y continuaba con una actitud de resistencia a mejorar su uso del lenguaje, a pesar de que le habían llamado la atención sobre ello:

[Alfonso, Fp03(1)]: Ó botarlle o ácido o cinc empeza a a botar vapor gas cara arriba burbullas e o tubo se quenta ó botarlle o ácido, (…)

[Alfonso, Fp04(2)]: Que non é posible xa que non pode ser que un motor consuma menos enerxía que o traballo que xera.

[Alfonso, Fp14(x)]: e ademais de que me daban o resultado positivo, cambiaba bastantante.

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Fp} = p_{3a}$: esquema ***ER1*** de Ana

Las diferencias entre el esquema de Ana y el de los alumnos del nivel *p4* están en que, aunque Ana sí adjudicó el valor *sistema abierto* para aquel ***sistema termodinámico*** que intercambia *materia* y *energía* con el ***entorno***, declaraba como "abiertos" los sistemas "abiertos a la atmósfera", esto es, contenidos en recipientes sin tapar, con presión igual a la del entorno. Estas afirmaciones no tienen por qué ser un reflejo exacto de una idea alternativa a la ciencia escolar, sino quizá de un uso vacilante del lenguaje, porque solamente a veces denomina "sistema abierto" a un "sistema contenido en recipiente abierto". En ocasiones, sus respuestas son ambiguas a este respecto, y se limitan a recoger expresiones matemáticas:

[Ana, Fp05(1)]: (…) Sistema pechado

$\Delta U = Q + 0$

Sistema aberto

$\Delta U = Q + W$

Su compañera de grupo Adela, con la que Ana solía colaborar estrechamente durante las clases, sí manifesta tener clara la diferencia entre un sistema abierto y un sistema cerrado en recipiente abierto:

[Adela, Fp05(1)]: (…) en el proceso en el que el recipiente estuviera pechado (…)

La expresión de Darío, aunque no tan cuidada, también apunta en la dirección de la ciencia escolar:

[Darío, Fp05(1)]: Non porque ao estar o sistema aberto, necesitase máis enerxía para que se leve a cabo a reacción e aumenta o volume. (...)

Ana tuvo dificultades para reconocer la naturaleza corpuscular de los sistemas materiales en el caso del estado gaseoso. En diversas ocasiones, por ejemplo, se refirió a diferentes sustancias gaseosas como "vapores" o "humos" indistintamente, y tendía a describir los gases como "más o menos densos" dependiendo de su aspecto visual. A lo largo de la fase previa, superó estas dificultades relacionadas con la elaboración de un modelo del estado gaseoso.

Al margen de estas ideas alternativas, utilizó adecuadamente las ***variables termodinámicas básicas*** y las ***variables termodinámicas principales*** como herramientas que permiten describir cualquier ***estado termodinámico*** definible.

Nivel $ER1_{Fp} = p_2$: subniveles $ER1_{Fp} = p_{2c}$, $ER1_{Fp} = p_{2b}$ y $ER1_{Fp} = p_{2a}$

Este nivel comprende tres subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{2c}, p_{2b} y p_{2a}.

Subnivel $ER1_{Fp} = p_{2c}$: esquema ***ER1*** de Adela

Este esquema se diferencia de los del nivel p_4 en que no se activaron los valores *sistemas abiertos* y *sistema heterogéneo*. Sin embargo, es posible que Adela las considerara adecuadas, porque sí utilizó con éxito los demás valores relacionados con las clasificaciones de los sistemas en función de las interacciones con el ***entorno*** y de la *composición en fases*. Por ejemplo, definió sin problemas los *sistemas cerrados*, y el universo como sistema aislado; también atribuyó el valor *sistema homogéneo* a sistemas objeto de estudio como, por ejemplo, el de la actividad *Fp04*:

[Adela, Fp04(x)]: $H_2O + O_2$ forman un sistema homogéneo ya que ambos son gases.

No presentó grandes dificultades en la construcción de las relaciones de la ciencia escolar.

Subnivel $ER1_{Fp} = p_{2b}$: esquema ***ER1*** de Benito

Este nivel incluye tres esquemas de razonamiento que se diferencian de los del nivel p_4 en que no se activó el valor *sistemas homogéneos* y en que se presenta una relación no deseable desde el punto de vista de la ciencia escolar.

En cuanto a la clasificación de los sistemas en función de su *composición en fases*, ésta es para Benito una propiedad que determina el estado de un sistema, pero no adjudicó al ***sistema termodinámico*** el valor *sistema homogéneo* en ninguna actividad; el valor *sistema heterogéneo* sí lo utilizó adecuadamente.

Su esquema ***ER1*** refleja que este alumno sostenía un modelo de estado líquido similar al de Alfonso. También tuvo dificultades para conceptualizar que la cantidad de materia permanece inalterada durante los procesos químicos, aunque las superó a lo largo de la intervención.

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Fp} = p_{2a}$: esquema ***ER1*** de Brais

El esquema ***ER1*** de Brais se diferencia de los del nivel p_4 en el mismo tipo de detalles que el de Benito: no se activó el valor *sistemas homogéneos* y se presentan algunas relaciones no deseables, en este caso, dos:

Brais tuvo dificultades para conceptualizar el número de mol como una variable extensiva. Además, a lo largo de la fase previa no llegó a establecer adecuadamente la diferencia entre la entalpía y la variación de entalpía. Consideraba que la variación de entalpía de una reacción se calcula restando los valores de entalpía de los reactivos los valores de entalpía de los reactivos:

[Brais, Fp14(1)]: (…) $\Delta H_{c/mol} = \Sigma H_{PROD} - \Sigma H_{REACT}$ = (…)

Parece bastante extendida entre el alumnado la dificultad para conceptualizar que la variación de algunas variables asociadas a un proceso se calcula operando sobre valores de variaciones de la variable correspondientes a otros procesos relacionados. En el apartado correspondiente a los esquemas idiosincrásicos ***ER3***, se analizan los problemas a los que se enfrentaron cinco de los estudiantes para diferenciar claramente la entalpía de la variación de entalpía, lo que lograron tres de ellos. Pero estos problemas no se limitan a la magnitud entalpía, como ha puesto de manifiesto la literatura científica (***Volumen A***) y como afirma Nono, el profesor de Física del centro, que comentó en las entrevistas la dificultad que supone para los estudiantes de 2º de Bachillerato desarrollar el concepto de variación de temperatura como "temperatura final menos temperatura inicial". En la presente investigación se observa que estas ideas están muy relacionadas con la falta de familiaridad con significados del dominio simbólico de representación del conocimiento: los alumnos que confundían H con ΔH reconocían que la variación de entalpía cuantifica las transferencias de energía sucedidas a lo largo de un proceso, pero en cuanto se les presentaba en forma de valor numérico, les costaba visualizar que éste representase la variación de una variable y no la cantidad de la variable. Estas ideas reaparecerían durante la implementación de la unidad didáctica *Termodinámica Química* (***Capítulo V***).

Los datos señalan que Brais, como Diana, Clara, Darío, Alfonso y Benito, tuvieron dificultades para comprender que la *cantidad de materia* de un ***sistema termodinámico*** no varía durante los ***procesos químicos***, idea que parece tener bastante acogida entre los estudiantes de Química del último curso preuniversitario. A lo largo de la fase previa, todos los alumnos de la muestra superaron esta dificultad y manifestaron la relación científicamente adecuada.

Otra relación en la que Brais mostró dudas fue en la clasificación del sistema de la actividad *Fp07* como *sistema cerrado*, posiblemente porque considerase que la reacción de neutralización entre hidróxido de sodio y ácido clorhídrico se llevaría a cabo en un recipiente abierto; por ello, consideraba imprescindible medir la masa antes y después de la reacción:

[Brais, Fp07(1)]: Medir as masas e as T° no Estado 1 e no estado 2.

A pesar de los obstáculos de aprendizaje que se encontraron, tanto Benito como Brais desarrollaron adecuadamente una expresión científica para definir, caracterizar e interpretar los estados termodinámicos de los sistemas materiales.

Nivel $ER1_{Fp} = p_1$: : subniveles $ER1_{Fp} = p_{1b}$ y $ER1_{Fp} = p_{1a}$

Subnivel $ER1_{Fp} = p_{1b}$: esquema ***ER1*** de Débora

Débora estableció un número de relaciones de ***ER1*** ligeramente menor que el del resto de sus compañeros, aunque las diferencias no son tan notables, a pesar de que ella dejó de asistir a clase después de la actividad *Fp07* mientras que los demás continuarían trabajando con normalidad (a excepción de Carlos, que llegaba unos diez minutos tarde a la mitad de las sesiones). Esto sucede porque las relaciones del esquema ***ER1*** se construyen desde las primeras actividades, a diferencia de lo que sucede con los demás esquemas. De hecho, los datos muestran que la mayor activación de relaciones de ***ER1*** se produjo en torno a la actividad *Fp05*, cuando esta estudiante no había abandonado las clases. Así, la primera mitad de la unidad didáctica ayudó a Débora a construir un ***ER*** lo suficientemente útil para describir e interpretar los sistemas a un nivel comparable al de varios de sus compañeros. En los apartados correspondientes a los demás ***ER***s se aprecia que las diferencias entre los esquemas idiosincrásicos de Débora y los de sus compañeros son mayores cuanto mayor es el nivel de abstracción y complejidad de los esquemas.

Débora no llegó a construir un significado tan completo para las ***magnitudes termodinámicas básicas*** del sistema, de las que no reconoció ni la dependencia con respecto a la *composición química* del mismo, ni su carácter extensivo o intensivo. Tampoco definió los *sistemas aislados*.

Hay dos relaciones que no construyó adecuadamente:

En primer lugar, tuvo dificultades para conceptualizar que los sistemas materiales están compuestos por partículas. Quizá la inseguridad en sus propias respuestas le llevara a manifestar, siguiendo a Darío, que los gases hidrógeno y oxígeno del motor propuesto en *Fp04* reaccionan para dar lugar a una molécula de agua que hace funcionar el motor (¡!):

[Débora, Fp04(1)]: Mediante un traballo mecánico o osíxeno gaseoso e o hidróxeno gaseoso reaccionan e dan lugar a unha molécula de auga. Esta molécula de

auga mediante un traballo eléctrico volve a transformarse en osíxeno e hidróxeno gaseosos.

También consideraba que en los procesos químicos varía la cantidad de materia de los sistemas. Al abandonar las clases, no tenemos constancia de que se produjeran cambios en sus ideas a este respecto.

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Fp} = p_{1a}$: esquema ***ER1*** de Carlos

En este subnivel se ha incluido el esquema de Carlos, que es el más alejado del referencial de la ciencia escolar. Con respecto al nivel p_4, no activó el elemento *composición en fases* como propiedad de los sistemas, y que se presentan varias ideas alternativas. También hay algunas dificultades que sí logró superar.

Carlos estableció inadecuadamente el significado de los *sistemas abiertos* como sistemas que intercambian *materia* y *energía* con el *entorno*, y, al igual que Débora, no construyó la idea de que la cantidad de materia permanece constante en los procesos químicos. Llama la atención que su ***ER1*** es más incompleto que el de Débora, a pesar de que ésta solamente asistió a la mitad de la intervención. Parece, pues, que la construcción de una estructura de razonamiento útil y fructífera para describir e interpretar las características de los sistemas termodinámicos se vio más perjudicada por la impuntualidad de Carlos que por el absentismo de Débora. Teniendo esto en cuenta, podemos considerar la habitual impuntualidad de Carlos como una forma implícita de absentismo. Débora faltó a las últimas actividades de *Termoquímica* y, antes de negarse a volver al aula, tuvo tiempo a trabajar con la mayor parte de las relaciones de ***ER1***, que se desarrollaron en las primeras actividades. Por el contrario, Carlos, que faltó a la quinta parte de la mitad de las sesiones, se perdió buena parte de las oportunidades para desarrollar estas relaciones. Su actitud poco responsable hacia el trabajo de aula perjudicó también el trato con sus compañeros, en especial con Clara, su compañera de grupo, que se cansó de su falta de colaboración y pasó a compartir sus conocimientos con los alumnos de $\boldsymbol{G_A}$ y $\boldsymbol{G_D}$.

Esquema *ER2*: *Procesos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 10* recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER2*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron durante la fase previa de la investigación. En la *Tabla 10* se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos

Cód que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***P***.

Tabla 10: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos (ER2)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	141	*P01*
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	29	*P02*
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	30	*P03*
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	32	*P04*
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	106	*P05*
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	32	*P06*
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	23	*P07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	23	*P08*
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	36	*P09*
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	9	*P10*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	23	*P11*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	23	*P12*
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	23	*P13*
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	0	*P14*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	18	*P15*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	48	*P16*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	41	*P17*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	137	*P18*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	86	*P19*
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	64	*P20*
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	33	*P21*
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	27	*P22*
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	47	*P23*
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	30	*P24*
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	31	*P25*
"CALOR ESPECÍF." / "CAPAC. CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*P26*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	52	*P27*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	28	*P28*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	40	*P29*
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	6	*P30*
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	0	*P31*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	30	*P32*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	93	*P33*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	69	*P34*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	80	*P35*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	26	*P36*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*P37*
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	93	*P38*
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	79	*P39*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	7	*P40*
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	64	*P41*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	44	*P42*
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	47	*P43*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	36	*P44*
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	33	*P45*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	0	*P46*
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	0	*P47*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	26	*P48*
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	26	*P49*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	23	*P50*
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	23	*P51*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	0	*P52*
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	0	*P53*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	9	*P54*
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	9	*P55*
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	0	*P56*

CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P57*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	78	*P58*
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	75	*P59*
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	12	*P60*
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	5	*P61*

El esquema referencial de razonamiento ***procesos termodinámicos*** se compone de 61 relaciones, y los datos de la *Tabla 10* muestran que los estudiantes activaron 51. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren al reconocimiento de las *reacciones químicas* como ***procesos termodinámicos*** que tienen lugar en los ***sistemas materiales***, así como a las ***condiciones*** en que tienen lugar dichos procesos y a las ***transferencias de energía*** implicadas. Se construyó una caracterización bastante completa de las transferencias energéticas, que se demuestra en la gran frecuencia de activación de las relaciones que convierten el *calor* y el *trabajo* en los procesos por los que los sistemas materiales intercambian con su entorno una cantidad de energía que se puede cuantificar mediante las variaciones de dos variables termodinámicas principales del sistema: la energía interna (cuya variación indica el total de las transferencias por calor y trabajo) y la entalpía (cuya variación da una idea del calor transferido en condiciones de presión constante).

De las 10 relaciones del ***ER2*** referencial que no se activaron, como ya era de prever, los alumnos no utilizaron las 2 relaciones que vinculan los conceptos de degradación de la energía y trabajo útil, respectivamente, con las variaciones de la entropía y la energía de Gibbs. Hay 6 relaciones que sí se esperaba que activaran, 2 sobre el "calor latente" y 4 sobre la clasificación de los procesos termodinámicos como isotérmicos o adiabáticos. Ninguna de ellas tiene una gran importancia en el referencial ***Procesos termodinámicos***, así que por no activarlas no habrá grandes pérdidas de capacidad descriptiva e interpretativa de los esquemas.

De las 61 relaciones del referencial ***ER2***, 56 se encuadran en el dominio macroscópico de representación del conocimiento, y las restantes 5 pertenecen al dominio microscópico o establecen alguna conexión directa con él. Los estudiantes activaron tres de ellas a lo largo de la fase previa, con una frecuencia de activación $f_{(micro)}$ **= 118**, y un promedio de activación bastante bajo: $\bar{x}_{(micro)}$ **= 24** (desviación típica muy elevada, $\sigma_{(micro)}$ **= 31**); dado el nivel inicial de conocimiento de los estudiantes, en clase no se trabajó con las relaciones que vinculan el calor específico al calor latente y a la distribución de energía de las partículas. La baja activación de las relaciones que anticipan un modelo de proceso químico contrasta con la gran activación de las relaciones microscópicas de ***ER1***, lo que indica que los alumnos tuvieron inicialmente más dificultades para utilizar un modelo sobre los procesos químicos en sus razonamientos sobre Termoquímica, que para aplicar algún modelo de partículas útil en la descripción de los estados termodinámicos de interés. Dado que la literatura del área insiste en que los estudiantes tienden a fijar su atención en los cambios (procesos) en detrimento de los estados (ver ***Volumen A***), se puede afirmar que las actividades de Termoquímica han servido para ayudar a los

alumnos de la muestra a construir razonamientos basados en el estudio comparativo de diferentes estados del sistema, y en su cuantificación mediante las magnitudes termodinámicas. Las relaciones macroscópicas de ***ER2*** tienen un valor de $f_{(macro)} = 2087$, con un promedio de activación aceptable, si se tiene en cuenta que ocho de estas relaciones no se activaron: $\bar{x}_{(macro)} = 37$, y con una desviación elevada, como era de esperar ($\sigma_{(macro)} = 33$).

De las 61 relaciones del referencial ***procesos termodinámicos***, 24 eran ya conocidas de cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación f y los correspondientes promedios de activación para estas relaciones y las 37 nuevas, se obtienen los siguientes datos: $f_{(no\ nuevas)} = 1211$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 50$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 40$; y $f_{(nuevas)} = 994$, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = 27$ y $\sigma_{(nuevas)} = 24$. Estos datos indican que los estudiantes no rechazaron la utilización de las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones, aunque la utilización de las ya conocidas es significativamente más frecuente. Teniendo en cuenta las circunstancias de aplicación de la unidad *Termoquímica* y los conocimientos de los que se partía, consideramos que estos datos de frecuencias de activación $f_{(no\ nuevas)}$ y $f_{(nuevas)}$ no indican una baja efectividad de la propuesta de enseñanza en la construcción de ideas nuevas sobre los procesos termodinámicos, sino más bien un refuerzo de las relaciones que se supone ya conocían y una aceptable activación de las nuevas. Algunos de los constructos termodinámicos que ya se habían trabajado en años anteriores no se recordaban, otros estaban completamente dominados por los significados cotidianos de los términos y por ideas alternativas propias de los primeros niveles de la enseñanza. Por ejemplo: las relaciones sobre los conceptos de calor y el trabajo como procesos de transferencia energética que se manifiestan macroscópicamente a través de variaciones de temperatura (calor) o de presión o volumen (trabajo). Se trata de relaciones que los alumnos ya deberían conocer desde varios cursos antes de 2º de Bachillerato. Sin embargo, al comienzo de la fase previa ningún estudiante de la muestra consideraba el calor o el trabajo como transferencias de energía. Lo mismo sucedió con otras ideas científicas, como las escalas Celsius y Kelvin de temperatura, la conservación de la energía, la ruptura y la formación de enlaces químicos en las reacciones químicas o el establecimiento de la variación de una magnitud como la diferencia entre los valores final e inicial de la misma. Los estudiantes tuvieron que superar bastantes dificultades para activar todas estas relaciones que en teoría debían ya manejar con soltura, y la construcción de estos conocimientos se tenía que reforzar entre cuatro y cinco meses antes de los exámenes de Selectividad. No es difícil imaginar el estrecho equilibrio de paciencia y exigencia en el que tuvo que mantenerse el profesor Rodrigo durante la implementación de las actividades, sobre todo cada vez que se veía obligado a detener el desarrollo de nuevas ideas para repasar conceptos y procedimientos que se suponían aprendidos desde hacía varios años.

En la *Tabla 11* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***procesos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*. Los datos de la tabla se organizan en las columnas que se explican en (*Esquema* ***ER1****: Sistemas termodinámicos*, pág. 716).

Tabla 11: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** *(****ER2****) en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	98	11	16	(6,14)
Fp02	*154*	*11*	*14*	*(14,14)*
Fp03	110	11	23	(3,21)
Fp04	113	11	24	(4,20)
Fp05	238	10	26	(0,25)
Fp06	*396*	*11*	*36*	*(36,36)*
Fp07	144	11	22	(6,18)
Fp08	134	10	19	(12,19)
Fp09	102	10	15	(9,19)
Fp10	*234*	*6*	*39*	*(39,39)*
Fp11	*150*	*6*	*25*	*(25,25)*
Fp12	125	10	19	(9,16)
Fp13	92	10	11	(8,11)
Fp14	78	10	11	(6,10)
Fp15	37	4	11	(0,11)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termoquímica*: 11 se presentaron a las actividades *Fp01* – *Fp07*, y 10 a las demás, con las excepciones de *Fp10* y *Fp11* (6 asistentes) y *Fp15* (5 asistentes). La muestra se componía de 11 individuos hasta la realización de *Fp08*, y desde entonces fueron 10, debido al absentismo de Débora. En 13 de las 15 actividades de *Termoquímica*, todos activaron relaciones de ***ER2***. Las excepciones son *Fp05*, en la que Diana dejó en blanco su guion de trabajo, y *Fp15*, en la que hizo lo propio Brais.

Lo primero que llama la atención al comparar los datos de la *Tabla 11* con la *Tabla 8* es que el número de relaciones activadas es significativamente menor en la segunda, tanto en los valores de *f* como en los de *R*. Esto se debe a dos causas:

En primer lugar, ***ER2*** contiene más relaciones cuyo *status* epistemológico es de tipo descriptivo o clasificativo, y los alumnos tienden a explicitarlas menos que las relaciones identificativas o explicativas/justificativas.

En segundo lugar, como ya hemos indicado, los estudiantes priorizaron en sus razonamientos aquellas relaciones que permiten describir e interpretar distintos estados del sistema, frente a las que describen los procesos físicos y químicos en sí. Para interpretar los cambios que se observaron o se predijeron, prefirieron basar sus explicaciones macroscópicas en los procesos de calor y trabajo, y sus justificaciones microscópicas en los modelos de partículas y de enlace, no tanto en los de reacción.

La tendencia a eclipsar la descripción de los procesos en favor de una reconstrucción de sus características a partir de los cambios ocurridos entre los

estados inicial y final del sistema, se confirma al comparar los indicadores *f*, *R* y *(mín,máx)* adjudicados a las actividades de indagación *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11* (señaladas en la *Tabla 11* con letra bastardilla), y los correspondientes valores de las actividades de exploración y de aplicación. Se activaron, en promedio, menos relaciones de ***ER2*** de las que se trataron en las actividades de indagación, y el perfil de activación sigue una clara tendencia ascendente hasta la primera mitad de la secuencia de actividades, y descendente después. Esta tendencia se explica al analizar el perfil de activación de las relaciones de ***ER3*** (*Tabla 14*, pág. 750), esquema relacionado con ***ER2*** (siendo éste más descriptivo y aquél más interpretativo):

En las primeras actividades de *Termoquímica*, a los alumnos les costaba utilizar sus conocimientos iniciales para estudiar los procesos físicos y químicos a partir de los cambios de estado termodinámico. A medida que se activaban más relaciones de ***ER3***, que permitían generar interpretaciones más completas sobre la dinámica de los procesos, la descripción de los procesos mejoró significativamente, y el número de relaciones de ***ER2*** aumentó hasta alcanzar su máximo en la mitad de la secuencia de actividades. Hacia el final de la propuesta, sin embargo, la activación de ***ER2*** cayó mientras que la de ***ER3*** se reforzaba. Las diferencias entre ***ER2*** y ***ER3*** se acrecientan hasta el final de la secuencia, debido a que los alumnos prefirieron no desarrollar tanto las descripciones de los procesos y centrar sus respuestas en los aspectos más interpretativos, de mayor poder interpretativo y menos laboriosos de redactar. Obsérvese la constancia en los *R* para *Fp13*, *Fp14*, y *Fp15*, comparada con el descenso en los *f*. La tendencia a activar menos relaciones en estas últimas actividades se puede atribuir a la componente actitudinal más que a dificultades en lo conceptual o procedimental, y más si se tiene en cuenta que la activación de ***ER1*** en estas últimas actividades apunta hacia una comprensión aceptable de los sistemas, que ***ER3*** no se vio resentido por los problemas actitudinales. Los alumnos relegaron ***ER2*** a favor de ***ER3***, para ofrecer respuestas más breves a las actividades.

Si se analizan los valores de las duplas *(mín,máx)*, se observa que prácticamente en todas las actividades cubren intervalos bastante amplios; así pues, existen grandes diferencias en la activación de relaciones de ***ER2*** entre los alumnos, lo que de nuevo apunta hacia la dicotomización de la muestra, indicativa de problemas actitudinales de algunos estudiantes. Pero, a diferencia de los resultados de activación de ***ER1***, los datos del esquema ***procesos termodinámicos*** muestran diferencias significativas entre los máximos estimados para las actividades de indagación y los máximos de las correspondientes actividades de aplicación. De aquí se deduce que incluso los alumnos que más relaciones de ***ER2*** utilizaron, no pusieron en juego todas las relaciones trabajadas en las actividades de indagación.

Los valores de *f* y *R* señalan que la actividad que condujo a una mayor activación de relaciones de ***Procesos termodinámicos*** es, a gran distancia de las demás, *Fp05* (exploración), junto con *Fp06* y *Fp11* (ambas de indagación). La

actividad que menos ayudó a activar fue *Fp15* (como sucedió con ***ER1***), debido a la baja asistencia de alumnos y a la apatía generalizada de los que asistieron.

La dispersión de los datos es significativa en casi todas las actividades salvo *Fp13*, aunque no se observa la consolidación de las relaciones de ***ER2*** trabajadas en *Fp12*. Al comparar *Fp07*, *Fp08* y *Fp09*, se ve que *Fp08* ayudó a ampliar las relaciones que pusieron de manifiesto en *Fp07*; pero entre *Fp08* y *Fp09*, implementadas en la misma sesión, se observa una pérdida notable relacionada con problemas de tipo actitudinal: los alumnos se centraban en analizar lo que resultaba más útil para ellos, que era describir e interpretar los procesos objeto de estudio comparando los estados del sistema mediante las variaciones de las variables termodinámicas, y con ellas construían una visión global y dinámica del proceso que dejaba de lado la descripción del proceso en sí, lo que les requeriría más esfuerzo y paciencia.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Procesos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de razonamiento idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la *Tabla 12*, siguiendo la misma clave de símbolos que se utilizó para la tabla *Tabla 9* (pág. 723).

Los niveles *p* de ordenación de los ***ER2*** idiosincrásicos son cinco, de p_1 a p_5 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para los niveles p_2 y p_3 (ver *Tabla 12*).

*Tabla 12: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento **ER2**, **Procesos termodinámicos**, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_5		p_4			p_3			p_2		p_1
			p_{4b}		p_{4a}	p_{3b}	p_{3a}				
ALUMNOS	**Alfonso**	**Darío**	**Benito**	**Brais**	**Ana**	**Carlos**	**Berta**	**Clara**	**Diana**	**Adela**	**Débora**
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	✓	✓	·	·
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	·	·	·	·	·	✖	·	·	✖	✖	·
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	💣	💣	💣	💣	💣	💣	💣	✖	💣	✖	✓
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓	💣	·
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	💣	💣	✓	💣	✓	✓	✓	✖	✓	💣	💣
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	·	·	✓	✓	✓	·	✓	·	·	✓	·
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	💣
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·	✓	✓	·
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓	✖	✖	✖
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓	✖	✖	✖
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·

CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	✓	✓	·	·	✓	✓	✖	✓	✖	💣	✓
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	✓	✓	·	·	✓	·	✖	✓	✖	✖	✓

A continuación se describen los esquemas ***ER2*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{ER2}_{Fp} = [p_1, \ldots, p_5]$.

Nivel $\boldsymbol{ER2}_{Fp} = p_5$: esquemas de Alfonso y Darío

En el nivel más acorde con el referencial de la ciencia escolar, se encuentran los esquemas ***ER2***, idénticos, de dos alumnos pertenecientes a grupos distintos: Alfonso, de G_A, y Darío, de G_D. Ambos activaron todos los elementos más relevantes para la resolución de las cuestiones planteadas; los esquemas no contienen los elementos específicos de la secuencia sobre Termodinámica Química (*variación de entropía* y *variación de energía de Gibbs*); en cuanto al *trabajo útil*, era poco esperable que se activara en esta fase de la intervención, pero Ana, Brais, Benito, Berta y Diana demostraron tener un significado embrionario del término; no así Alfonso y Darío. Éstos no activaron la variable *calor latente* y los valores *procesos isotérmicos* y *procesos adiabáticos*, aunque el potencial interpretativo de los razonamientos elaborados no se resiente significativamente por ello. Tampoco hicieron explícita la idea de que, en un proceso cíclico, las funciones de estado no experimentan variación entre los estados inicial y final. Por lo demás, los esquemas ***ER2*** de estos alumnos son bastante completos al final de la fase previa.

Las dificultades a las que se enfrentaron ambos son comunes a más estudiantes: conceptualizar el calor y el trabajo como procesos de transferencia de energía. Darío, como consecuencia de sus iniciales ideas alternativas sobre el trabajo, no había adquirido la noción de conservación de la energía:

[Darío, Fp04(2)]: Que a comprara, porque se o motor consume máis cantidade de energía do traballo que produce, non sae rentable.

Los dos alumnos del nivel p_5 manifestaron que el ***sistema termodinámico*** experimenta ***procesos termodinámicos***, y reconocieron los *cambios de estado* como *procesos físicos* y las *disoluciones* (que dan lugar a *sistemas homogéneos*) y las *reacciones químicas* como ***procesos químicos***. Hicieron explícito que los ***procesos termodinámicos*** tienen lugar en unas ***condiciones del proceso***, que vienen representadas por las variables *temperatura* y *presión*, las cuales pueden mantenerse en valores de *temperatura constante*, *presión constante* o *volumen constante*. Calificaron los procesos a *presión constante* como *procesos isobáricos*, y los procesos a *volumen constante* como *procesos isocóricos*. Establecieron adecuadamente las *etapas* como artificios que la Ciencia utiliza para estudiar los ***procesos termodinámicos***, aunque las evoluciones de los sistemas no se produzcan tal como se escriban las etapas.

Reconocieron que los ***procesos termodinámicos*** pueden implicar ***transferencias de energía*** y las ***transferencias de materia***, que se producen a través de la *pared* del sistema. En una lenta evolución de sus ideas, llegaron a identificar el *calor* y el *trabajo* como ***transferencias de energía*** relacionadas, respectivamente, con la *variación de temperatura* (*calor*) y con la *variación de presión* o *variación de volumen* del sistema (*trabajo*). Establecieron la diferencia entre el *calor a presión constante* y el *calor a volumen constante*. También manifestaron que el *calor* depende de la naturaleza química del sistema, mediante la relación con el *calor específico / capacidad calorífica*. Construyeron un significado completo para las transferencias de energía, especificando que hay dos ***variaciones de las funciones de estado*** del sistema que las cuantifican: la *variación de energía interna* y la *variación de entalpía*. También establecieron las reglas que rigen las transferencias energéticas, y que son la base de la dinámica de los procesos físicos y químicos: la *conservación de la energía* y la *degradación de la energía*.

En cuanto a la descripción de los procesos como evoluciones del ***sistema termodinámico***, hicieron explícito que éstos tienen lugar en un ***sentido del proceso*** y siguen un ***camino termodinámico***, que consiste en una ***sucesión de estados termodinámicos*** entre los *estados inicial y final* del sistema y que pasa por *estados intermedios*, y dieron sentido a los *procesos cíclicos* como aquellos que siguen un *camino cerrado*, no un *camino abierto*. No llegaron a advertir que los *procesos cíclicos* se caracterizan por ***variaciones de las funciones de estado*** iguales a cero, pero en las actividades de la fase previa se trabajó con solamente un proceso cíclico.

Nivel $ER2_{Fp}$ = p_4: subniveles p_{4b} y p_{4a}

Este nivel comprende los dos subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{4b} y p_{4a}.

Subnivel $ER2_{Fp}$ = p_{4b}: esquemas de Brais y Benito

Los esquemas de estos dos alumnos difieren de los más adecuados en que no activaron el elemento *disoluciones*, aunque sí reconocieron las *reacciones químicas* como ***procesos químicos***. Por lo demás, definieron y caracterizaron los ***procesos termodinámicos*** utilizando todas las relaciones acordes con las de la ciencia escolar, y e hicieron útiles las ***transferencias de energía*** *calor* y *trabajo* para interpretar los cambios sucedidos en los ***sistemas termodinámicos***, aunque tuvieron dificultades al principio de la intervención para conceptualizar el calor como un proceso de transferencia de energía; Benito conocía la naturaleza del trabajo. También pusieron de manifiesto las reglas que rigen las transferencias energéticas: la *conservación de la energía* y la *degradación de la energía*.

Ambos utilizaron sin grandes dificultades la perspectiva termodinámica para describir e interpretar los cambios que suceden en los sistemas materiales. Donde más diferencias se observan entre los esquemas de Brais y Benito, es en la

utilización del lenguaje científico: Benito, por lo general, se esmeraba en describir minuciosamente sus observaciones e interpretaciones, mientras que Brais respondía las cuestiones planteadas con pocas palabras y, en ocasiones, muy poco meditadas, como se observa en la actividad *Fp03*:

[Brais, Fp03(1)]: Ao liberar gas provócase o burbulleo e a rotura dos enlaces provoca o desprendemento de calor en forma de enerxía.

Las interferencias con el léxico cotidiano se observan también en Benito, que tuvo que explicar sobre la marcha del debate en gran grupo que sus manifestaciones iniciales a la actividad *Fp04* no se referían a la energía interna del sistema, sino a un aporte de energía previo al encendido del motor perpetuo, como "nunha batería":

[Benito, Fp04(2)]: Non pode ser, porque a non ser que o sistema teña enerxía interna, un motor non pode xerar máis traballo que a enerxía que se lle aplica

En las manifestaciones de Benito se encuentran las afirmaciones más avanzadas de la muestra sobre aspectos heurísticos, incluyendo la formulación de hipótesis personales o la proposición de métodos o técnicas que permitirían poner a prueba sus ideas. La expresión escrita con la que comunicó estas ideas es muy cuidadosa, aunque él no estuviera del todo seguro de la calidad de su respuesta, como se observa en las dos transcripciones siguientes. En la primera, Benito no acudió a las ideas ya trabajadas para identificar la reacción química entre zinc y ácido clorhídrico, sino que la dedujo de sus observaciones experienciales. En la segunda transcripción, sí estaba seguro de sus conocimientos: no es fácil estimar ("adivinar") los moles de un determinado nutriente que tiene un alimento, pero sí medir la masa del mismo.

[Benito, Fp03(1)]: O Zn $_{(s)}$ desaparece, e a reacción bota fume, supoño que reacciona co HCl, (…)

[Benito, Fp15(1)]: (…) porque é moi facil pesar un alimento pero é moi difícil adiviñar os seus moles

En las últimas actividades, las respuestas escritas de Benito se hicieron más escuetas, debido a los obstáculos actitudinales: para que sus compañeros de grupo Brais y Berta no se beneficiaran de su trabajo sin aportar nada a cambio, Benito redujo sus manifestaciones escritas al mínimo imprescindible para responder las cuestiones de manera inteligible; sin embargo, continuó participando mucho en los debates de clase.

Subnivel $\boldsymbol{ER2}_{Fp} = p_{4a}$: esquema de Ana

El esquema ***ER2*** de Ana se diferencia de los del nivel p_5 en que, aunque incorpora el significado del *trabajo útil*, tuvo problemas para enfocar los *cambios de estado* como ***procesos físicos***. En general, los modelos de estructura y enlace químico de los alumnos de la muestra eran bastante pobres al comienzo de la intervención.

Por ejemplo, en *Fp14*, hasta que se produjo la intervención del profesor, Ana creía que los únicos enlaces químicos que se rompían en las reacciones de combustión eran los de los hidrocarburos. En *Fp04*, afirmó que la reacción de hidrólisis del agua líquida es un proceso físico de cambio de estado de agregación, porque el sistema, inicialmente en estado líquido, pasa a consistir en una mezcla de gases:

[Ana, Fp04]: Debido ó cambio de estado (líquido a gases) prodúcese un aumento de volume (…)

Pero, a diferencia de varios de sus compañeros, rescataba tecnicismos para intentar describir sus interpretaciones. Por ejemplo, en *Fp03* describía los enlaces entre los átomos de H y Cl de la molécula de ácido clorhídrico como "enlaces de hidrógeno". También Débora y Diana tendían, en las primeras actividades, a introducir palabras técnicas para intentar expresarse de una manera más culta:

[Débora, Fp01(1)]: Cos cambios de temperatura as moléculas de auga desnaturalízanse e fórmanse burbullas a causa da ebullición de osíxeno. (…)

Finalizada la fase previa, Ana mejoró significativamente en su utilización del lenguaje científico para definir y caracterizar los procesos termodinámicos.

Las manifestaciones de Ana son muy detalladas y prolijas: en prácticamente todas las actividades, describe de manera exhaustiva sus observaciones y recoge cuidadosamente las intervenciones del profesor y de sus compañeros, especialmente de Adela, Alfonso y Clara, y en menor medida de Carlos y Benito. Esta tendencia a detallar mucho las respuestas y recoger ideas de varias fuentes también se observa en Adela, aunque algunas de las manifestaciones escritas de ésta se centraron más en reelaborar las de Ana y no tanto en desarrollar las suyas propias. Por otra parte, Adela parecía obsesionada por la limpieza de sus apuntes, hasta el extremo de realizar todas sus anotaciones a lápiz y transcribirlas a bolígrafo al día siguiente. Al comienzo de la fase previa, Ana también se preocupaba mucho por estos detalles, pero con el tiempo dejó de pasar a limpio sus respuestas escritas.

Nivel $ER2_{Fp} = p_3$: subniveles $ER2_{Fp} = p_{3b}$ y $ER2_{Fp} = p_{3a}$

En este nivel se diferencian dos subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{3b} y p_{3a}.

Subnivel $ER2_{Fp} = p_{3b}$: Carlos

Con respecto a los esquemas de sus compañeros, en el esquema de Carlos no se activaron las siguientes relaciones:

No hizo explícito que los *estados intermedios* son aquellos comprendidos entre los *estados inicial y final* del sistema, aunque puede que conceptualizara que los ***procesos termodinámicos*** no consisten en un salto inmediato de aquél a éste. No reconoció el *trabajo útil* ni las condiciones de *temperatura constante*, y no describió que las ***disoluciones*** dan lugar a *sistemas homogéneos*. Definió los procesos cíclicos como

aquéllos en los que coinciden los *estados inicial y final*, pero consideró que las ***variaciones de las funciones de estado*** pueden ser no nulas en un *proceso cíclico*.

En la *Tabla 12* (pág. 737) apenas se ven símbolos 💣, que indicarían los obstáculos a los que se enfrentó Carlos en la construcción de su ***ER2***; pero esto se debe sobre todo a la dificultad que tuvieron los investigadores para realizar asignaciones ausentes en su esquema, porque el trabajo de Carlos en el aula fue bastante pobre en comparación con el de sus compañeros: llegó unos diez minutos tarde a la mitad de las sesiones de clase, y no participó muy activamente ni en los debates en grupo de clase ni en los debates en pequeño grupo. De hecho, su compañera Clara prefería compartir sus ideas con los grupos G_D (Diana, Darío y Débora) y G_A (Ana, Alfonso y Adela). Las características más destacadas de las respuestas de Carlos son la extensión breve y el énfasis que dedicaba a afirmar que después de la explicación del profesor él había entendido aspectos de gran importancia… que casi nunca llegaba a citar:

[Carlos, Fp03(x)]: Comprendín o porque da importancia de que forma un sistema aberto, como reacciona o Zn co HCl e comprendín mellor o proceso de combustión reacción. Tamén variaron as miñas observacións, xa que nesta reacción e moi importante saber o que forma parte del

[Carlos, Fp05(x)]: Conprendín o cambio e a gran diferenza que se produce ao efectuar dous procesos iguais en sistemas abertos e pechados, xa que a presión xoga un factor decisivo

Tamén entendín porque usando certos reactivos a cantidade de productos obtida e menor.

[Carlos, Fp12(x)]: Chamoume a atención o feito de que por non ter en conta o calorímetro os meus cálculos eran erroneos

[Carlos, Fp14(x)]: Explicounos a importancia e os tipos de enlaces que se dan nas reacción, tamén a forza destos

Subnivel $ER2_{Fp} = p_{3a}$: Clara y Berta

En este subnivel se encuentran los esquemas de Clara y Berta, que se diferencian de los de p_5 en que no se activó uno de estos dos elementos: *estados intermedios* (en el esquema de Berta) o *trabajo útil* (Clara). Además, ninguna de las dos reconoció las condiciones de *temperatura constante*.

Berta superó las dificultades iniciales para construir la concepción de *calor* y *trabajo* como procesos de transferencia energética, y no "formas de energía", como los consideraba en un principio. También le costó establecer la relación entre calor y variación de temperatura, y la noción de *proceso termodinámico* como la *sucesión de estados* del sistema entre el *estado inicial y el final*, pasando por *estados intermedios* cuyas características se desconocen.

Clara mantuvo una pugna continua por superar la visión alternativa del calor como una forma de energía, lo que se aprecia en las siguientes transcripciones:

[Clara, Fp03(1)]: (…) ~~e libérase calor~~ O tubo quentase

[Clara, Fp04(1)]: (…) comezamos polo H_2 + O_2 aplicandolles un traballo (mec) o sistema libera enerxía e formarase a auga, a está se se lle aplica un traballo (elect) absorverá enerxía e pasará a formar H_2 + O_2 gas. (…)

[Clara, Fp15(1)]: (…) - Sí, porque se degrada por un proceso de calor (…) Non, a expresión refírese en liberar enerxía en forma de calor e traballo.

Como a Ana, le resultó difícil conceptualizar la diferencia entre los procesos físicos y químicos:

[Clara, Fp04(1)]: (…) pódese partir dun composto, a auga ou do $H_{2\,(g)}$ + $O_{2\,(g)}$, que aplicandolles un traballo prodúcese un cambio no seu estado. (…)

Por ejemplo, para Berta, en la reacción de la actividad *Fp01* el $Zn_{(s)}$ se disuelve y el $HCl_{(aq)}$ también, y la mezcla resultante de estas "disoluciones" (cuya concepción se acerca a la de *cambios de estado*) es "homogénea", en el sentido de que su aspecto es uniforme, no presenta soluciones de continuidad que delimiten varias regiones cuyas propiedades perceptibles sean diferentes entre sí:

[Berta, Fp03(1)]: Os dous productos disolvense e forman unha disolución homoxenea e a sua vez solta ao exterior unha especie de gas como se fose vapor de auga, (…)

Al comienzo de la intervención, en general se presentaron dificultades para describir las disoluciones aun cuando la mayoría de los alumnos reconocían que se trata de procesos químicos. En sus respuestas consideran que el sólido "desaparece" (Benito), "se deshace" (Adela), o "se diluye" (Carlos y Clara).

Nivel $ER2_{Fp}$ = p_2: esquemas de Diana y Adela

Los ***ER2*** de Diana y Adela contienen cinco relaciones alternativas cada uno. Con respecto a los esquemas de los niveles superiores, Diana no activó el elemento *trabajo útil*, a diferencia de Adela, que no hizo explícito el hecho de que los sistemas materiales evolucionan entre los *estados inicial y final* a través de *estados intermedios*.

Ambas alumnas llegaron a definir y describir los ***procesos termodinámicos*** utilizando las ***variaciones de las funciones de estado***, e identificaron las ***condiciones del proceso*** que concretan la evolución del sistema. Sin embargo, antes de la fase previa demostraban ideas inadecuadas sobre las características de los procesos físicos y químicos, y después de terminar las actividades de *Termoquímica* sus modelos no se habían acercado lo suficiente a las ideas de la ciencia escolar. Diana consideraba la ebullición del agua un proceso químico, y las disoluciones, como procesos físicos, que no dan lugar a sistemas homogéneos. Según sus ideas, al elevar

la temperatura del agua hasta los 100 ºC, se produce una lisis del agua, que ella denomina "desnaturalización" de la molécula H_2O:

[Diana, Fp01(1)]: Cos cambios de temperatura, rómpense desnaturalízanse as moléculas de H_2O. As burbullas son debidas á liberación de O_2 e faise o vacío.

En *Fp03*, conceptualizó la reacción química entre zinc y ácido clorhídrico como un cambio de estado del Zn (al que denominó indistintamente "disolución" y "cambio de estado"), mientras el HCl se "calentaba" y emitía hidrógeno gaseoso:

[Diana, Fp03(1)]: (…), mestúranse e disólvense a granalla de cinc. Además cando botamos o HCl quéntase o tubo, burbullea.

Cambio de estado sólido do Zn a líquido transparente.

Liberación de H_2

También tuvo dificultades para determinar cuál es la composición del estado final del sistema en la disolución del hidróxido de sodio en agua:

[Diana, Fp07(1)]: Teríamos que medir a temperatura (T_i) no ESTADO 1 (NaOH – H_2O) e no ESTADO 2 (Na + OH) (T_2)

Adela logró superar su concepción alternativa de las disoluciones como procesos físicos:

[Adela, Fp07(1)]: (…) Hay una interacción con el H_2O ya que NaOH es sólido y Na^+, OH^+ serían acuosos

Sin embargo, aunque no identificó adecuadamente que el estado final de un proceso de disolución consiste en un *sistema homogéneo*. Recordemos que esta alumna estableció una clasificación alternativa de los ***sistemas termodinámicos*** según su *composición en fases*, porque consideraba que un *sistema homogéneo* es aquél que está compuesto por una sola sustancia química.

Ambas expresaron que las ***variaciones de las funciones de estado*** del sistema en un *proceso cíclico* no son necesariamente nulas. Quizá esta idea alternativa tenga que ver con las dificultades relacionadas con los modelos microscópicos alejados de la ciencia escolar, al menos en el caso de Adela: para esta alumna, el comportamiento de los sistemas a nivel microscópico es impredecible.

En cuanto a las transferencias energéticas por calor, Adela no llegó a establecer la idea científica, y Diana tardó en hacerlo (como la mayoría de los alumnos). El conflicto conceptual se percibe en las siguientes manifestaciones:

[Diana, Fp03(x)]: (…) A enerxía a atopamos en forma de q. (…) Intercambio enerxía polo proceso de calor (q) (…)

El gran esfuerzo cognitivo que tuvo que realizar Adela para aplicar la definición científica de calor la hizo confundir éste con el calor específico, que

problablemente considerara, al principio, como el calor/energía que se transfiere *específicamente* en el proceso dado y para la cantidad de sustancia considerada:

[Adela, Fp08(x)]: Para calcular el calor específico, la masa que se usa es la masa del NaOH junto con la masa del H_2O.

Por su parte, Adela ya utilizaba desde el principio la idea de que las ***transferencias de energía*** verifican la *conservación* de la misma en los ***procesos termodinámicos***, y Diana construyó esta relación sobre la marcha, aunque en sus respuestas a *Fp04* afirmaba que el ***móvil perpetuo de primera especie*** es posible. Esta idea suya parece más relacionada con la utilización de la idea cotidiana de la energía como "consumo energético" que con una concepción alternativa del trabajo, porque en la actividad anterior había utilizado adecuadamente la noción de trabajo, y, en *Fp04*, su explicación del funcionamiento del motor perpetuo hace ver que para ella el trabajo es un proceso por el que se aporta desde el entorno una cantidad de energía que, dependiendo del tipo de trabajo aplicado, produce distintos efectos (bastante impredecibles) en el sistema. A la hora de justificar la cantidad de "trabajo realizado", Diana consideró que el motor "consume" una cantidad de energía, y que la cantidad de energía que puede transferir por trabajo es mayor que dicho "consumo". Parece que aquí hay una alusión indirecta a una no conservación de la energía en los procesos termodinámicos, debida nuevamente a dificultades relacionadas con las ideas microscópicas: los efectos que tiene la energía transferida sobre el sistema son los responsables de que éste responda de manera improvisada o mágica, y que se genere energía dentro del sistema o se ponga de manifiesto alguna cantidad de energía que antes permanecía latente o almacenada. Aunque Adela también consideraba que los mecanismos microscópicos tienen efectos poco predecibles sobre los sistemas, en todo caso la energía:

[Adela, Fp04(2)]: (…) la E ni se crea ni se destruye solo se transforma (…)

En sus manifestaciones finales de *Fp04*, Diana expresó su desconcierto dejando en blanco el apartado final de la actividad, pero en el debate final en pequeño grupo explicó a Clara una idea que ésta apuntó:

[Clara, Fp04(x)]: (…) E que ese traballo non se lle está aplicando constantemente.

Nivel $ER2_{Fp}$ = p_1: Débora

Como era de esperar, teniendo en cuenta que Débora solamente asistió a la mitad de las actividades de la secuencia *Termoquímica*, su esquema es el menos completo de la muestra. No activó los elementos *trabajo útil*, *temperatura constante* y *estados intermedios*, ni el establecimiento de *etapas* para estudiar los ***procesos termodinámicos***. Tampoco hizo explícito que los procesos cíclicos se caracterizan por la invariancia de las funciones de estado, y que la cantidad de energía transferida por calor depende de las características de las sustancias implicadas, lo que se cuantifica mediante el calor específico.

Sus modelos iniciales sobre los procesos físicos y químicos también eran inadecuados: para ella, la ebullición del agua implica una "desnaturalización de las moléculas del agua" y un burbujeo debido a la "ebullición de oxígeno". Cualquier cambio en los estados de agregación presentes le hacen identificar el proceso como un cambio de estado, como sucede con el proceso entre el Zn y el HCl:

[Débora, Fp03(x)]: (…) a granalla de zinc pasa de estado sólido a líquido o añadir o ácido clorhídrico. (…)

Los escasos conocimientos de esta alumna sobre los modelos microscópicos de la materia explican, en parte, que presentara dificultades para conceptualizar el trabajo como un proceso macroscópico de transferencia de energía. Para Débora, si el sistema realiza trabajo, éste puede deberse a la acción de una molécula, y si se traduce a nivel macroscópico, se manifiesta como un esfuerzo que produce el sistema sobre el entorno, y que puede ser mayor o menor dependiendo de la magnitud de los cambios observados: "traballa máis" (*Fp04*).

Esquema *ER3*: *Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 13* recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER3*** de los alumnos, con las correspondientes frecuencias de activación *f* y los códigos ***Cód*** mediante los que se describen las relaciones del esquema, representadas por el símbolo ***A***.

Tabla 13: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	6	***A01***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	19	***A02***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	131	***A03***
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	61	***A04***
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	0	***A05***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	32	***A06***
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	11	***A07***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	116	***A08***
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	8	***A09***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	13	***A10***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	11	***A11***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	107	***A12***
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	106	***A13***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	***A14***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	141	***A15***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	99	***A16***

VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	55	***A17***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	61	***A18***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	45	***A19***
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	36	***A20***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	118	***A21***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	101	***A22***
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	103	***A23***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	89	***A24***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	58	***A25***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	7	***A26***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	72	***A27***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	***A28***
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	0	***A29***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	0	***A30***
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	0	***A31***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	17	***A32***
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A33***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	0	***A34***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	0	***A35***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	0	***A36***
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	0	***A37***
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A38***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	0	***A39***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A40***
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	3	***A41***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A42***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	0	***A43***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	0	***A44***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	0	***A45***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	0	***A46***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	0	***A47***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A48***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	0	***A49***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO ($dG < 0$)	0	***A50***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" ($dG = 0$)	0	***A51***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO ($dG > 0$)	0	***A52***

De las 52 relaciones que componen el esquema referencial de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, los alumnos de la muestra activaron 27. Éste es un buen resultado, porque las 25 relaciones no activadas se refieren a la espontaneidad e irreversibilidad de los procesos termodinámicos y, por tanto, lo esperable en la fase previa es precisamente su no activación.

Las relaciones de mayor frecuencia son las que se refieren a la conexión entre el sentido del proceso y la evolución del sistema, al balance energético del sistema como consecuencia del proceso termodinámico, y a la caracterización de éste utilizando las variaciones de las magnitudes termodinámicas; con especial frecuencia se activaron las variaciones de presión, de energía interna y de entalpía para estudiar los procesos termodinámicos. Nuevamente se observa una alta

frecuencia de activación para las relaciones sobre las transferencias energéticas y su cuantificación con las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales, lo que indica que las actividades fueron útiles en la construcción de esquemas mediante los que se pueden estudiar los cambios energéticos de los sistemas.

El número de relaciones de ***ER3*** que se encuadran en el dominio macroscópico de representación del conocimiento es de 48 sobre el total de 52, y los alumnos activan las 4 que establecen alguna conexión con los modelos microscópicos. La frecuencia de activación f de las relaciones microscópicas es $f_{(micro)} = 45$, con un promedio de activación bajo: $\bar{x}_{(micro)} = 11$ (desviación típica $\sigma_{(micro)} = 2$). Las relaciones macroscópicas tienen $f_{(macro)} = 1583$, con un promedio de activación $\bar{x}_{(macro)} = 33$ y $\sigma_{(macro)} = 46$.

No es sorprendente que las desviaciones típicas de los ***ER3*** en la fase previa tengan valores tan altos: se esperaba que se activaran alrededor de la mitad de las relaciones de este esquema.

El promedio de activación de las relaciones microscópicas es bajo, porque las relaciones sobre la formación y ruptura de enlaces entre partículas se trabajaron solamente en las dos últimas actividades y los alumnos, cuando ponían en juego sus conocimientos del dominio microscópico, se limitaban a modelos simples de partículas, sin entrar en detalles sobre las interacciones entre las mismas. Por ejemplo, dos de las relaciones centrales del modelo microscópico de proceso químico (***A10*** *y* ***A11***) solamente se activan, respectivamente, 13 y 10 veces a lo largo de las 15 actividades de *Termoquímica*.

Sin embargo, los estudiantes se sintieron cómodos con la relación entre la variación de entalpía y la estabilidad del sistema, que utilizaron 72 veces, considerándola una propiedad importante en el estudio dinámico de los procesos por estar ligada a las interacciones energéticas entre sistema y entorno, y por ser cuantificable mediante la variación de entalpía. Entre la ruptura y la formación de enlaces químicos también se observan diferencias: aunque los alumnos recurren casi por igual a expresar que la composición química del sistema cambia porque se producen rupturas y formaciones de interacciones, prefieren centrarse en la liberación de energía que se produce con la formación de enlaces, y apenas recurren a la absorción de energía asociada a la ruptura; solamente Darío hace mención una vez a este aspecto, y en *Fp04*, cuando todavía no se pedía explícitamente que detallaran los intercambios energéticos a nivel microscópico. Las dificultades para conceptualizar que la ruptura de enlaces requiere energía es consistente con las ideas alternativas descritas en la literatura (ver ***Volumen A***).

De las 52 relaciones de *aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*, solamente 8 eran conocidas para el alumnado, mientras que las relaciones nuevas sumaban un total de 44. Los parámetros de activación se enumeran a continuación:

$f_{(no\ nuevas)}$ **= 326**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 41** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 31**; y $f_{(nuevas)}$ **= 1302**, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 30**, y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 46**. Así pues, los estudiantes utilizaron las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones sobre los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, sin postergar las ya conocidas. Los valores de frecuencia de las relaciones nuevas son más elevados para ***ER3*** (44 relaciones) que para ***ER2*** (37), aunque los promedios de activación son similares y ligeramente superiores en ***ER3***: $f_{(nuevas,ER3)}$ **= 1300** frente a $f_{(nuevas,ER2)}$ **= 994**, y $\bar{x}_{(nuevas,ER3)}$ **= 30** frente a $\bar{x}_{(nuevas,ER2)}$ **= 27**. Estos datos demuestran la efectividad de las actividades de Termoquímica para activar relaciones conceptuales sobre la caracterización de los procesos termodinámicos, a través de los cambios que suceden en la temperatura, presión y volumen del sistema, y de los balances energéticos asociados a los procesos, que se pueden estudiar mediante las variaciones de las magnitudes termodinámicas *U* y *H*. Las bajas $\bar{x}_{(nuevas)}$ de ***ER2*** y ***ER3*** obedecen al hecho de que muchas de las relaciones nuevas tratan la espontaneidad e irreversibilidad de los procesos, y por tanto no se activaron en la unidad didáctica sobre Termoquímica.

En la *Tabla 14* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, para las 15 actividades.

Tabla 14: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3)*** *en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	52	11	8	(3,6)
Fp02	*55*	*11*	*5*	*(5,5)*
Fp03	81	11	15	(3,15)
Fp04	137	11	18	(8,17)
Fp05	156	10	20	(0,17)
Fp06	*165*	*11*	*15*	*(15,15)*
Fp07	136	11	14	(5,14)
Fp08	116	10	12	(10,12)
Fp09	112	10	14	(11,14)
Fp10	*102*	*6*	*17*	*(17,17)*
Fp11	*90*	*10*	*15*	*(15,15)*
Fp12	120	10	17	(9,14)
Fp13	111	10	14	(10,14)
Fp14	159	10	19	(10,19)
Fp15	36	4	9	(0,9)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termoquímica*: 11 se presentaron a las actividades *Fp01 – Fp07*, y 10 a las demás, con las excepciones de *Fp10* y *Fp11* (6 asistentes) y *Fp15* (5 asistentes). La muestra, que en un principio contaba con 11 individuos, pasó a tener 10 a partir de *Fp08*.

Sólo en 2 de las 15 actividades de *Termoquímica* hubo algún alumno que no activó relaciones de ***ER3***: se trata de *Fp05* y *Fp15*, en las que uno de los estudiantes (Diana en el primer caso, Brais en el segundo) dejó en blanco su guion de trabajo.

Al comparar los datos de esta tabla con los que se recogen en las correspondientes a ***ER2*** y ***ER1*** (*Tabla 8*, pág. 720, y *Tabla 11*, pág. 735), se observa que los valores estimados de manera teórica para las actividades de indagación de ***ER3*** son bastante menores que los de ***ER2***, pero las frecuencias de activación que corresponden a las actividades de exploración y aplicación (de las que se disponen manifestaciones escritas del alumnado) no son muy diferentes en uno y otro esquema, lo que demuestra que los estudiantes dieron tanta importancia a describir los cambios sucedidos en el sistema (***ER2***) como a reconstruir los detalles dinámicos del proceso (***ER3***); es más, como ya se ha comentado en (***Esquema ER2: Procesos termodinámicos***, pág. 731), en la segunda mitad de la secuencia de actividades, los alumnos prefirieron concentrar más esfuerzos en interpretar los procesos a partir de las variaciones de las magnitudes termodinámicas (***ER3***) que en describir los procesos atendiendo a sus características (***ER2***). Esta tendencia indica que las actividades de la secuencia *Termoquímica* fueron útiles para la elaboración de interpretaciones dinámicas sobre los procesos termodinámicos. De hecho, las frecuencias de activación adjudicadas a las actividades de indagación *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11* y las de las correspondientes actividades de exploración y de aplicación no son sustancialmente diferentes, así que se activaron todas o prácticamente todas las relaciones tratadas en las actividades de indagación.

Los valores de los indicadores *f*, *R* y *(mín,máx)* de ***ER3*** a lo largo de la secuencia *Termoquímica* revelan un rápido crecimiento inicial en el número de relaciones activadas (valores de *R*) y en las frecuencias de activación (valores de *f*), que adoptan sus valores máximos en el entorno de *Fp04* a *Fp07* (con un nuevo pico de frecuencia en *Fp14*). A partir de *Fp08* no se observan pérdidas apreciables en la activación, con la excepción de *Fp15*, cuyos bajos indicadores *f* y *R* se explican por la escasa asistencia de alumnos y los problemas actitudinales ya comentados en los apartados anteriores. Estos datos permiten inferir que los estudiantes avanzaron significativamente en la activación de relaciones de ***ER3***, y que, para la mayoría, las relaciones sobre la dinámica de los procesos químicos adquirieron una gran utilidad en la construcción de razonamientos argumentativos; esto explica las altas frecuencias de activación que se mantuvieron incluso en las actividades en las que se observaron los mayores obstáculos de tipo actitudinal, a diferencia de lo que sucedió con el desarrollo de las relaciones de ***ER2***.

Las duplas *(mín,máx)*, cubren intervalos bastantes amplios en algunas actividades, mientras que en otras son prácticamente nulas. Aquéllas con menor dispersión de datos son la primera actividad (lo que indica que los alumnos partían de unos conocimientos más o menos similares) y las que ocupan una posición intermedia en la secuencia (*Fp08*, *Fp12* y *Fp13*), lo que coincide con la información aportada por los valores de *f* y *R*. Las actividades con duplas más amplias aparecen espaciadas: *Fp03*, actividad de aplicación; *Fp07*, muy demandante conceptualmente, en la que se pide a los alumnos que diseñen una experiencia de laboratorio

mediante la que puedan medir las transferencias de energía por calor asociadas a una reacción química; y entre *Fp12* y *F15* (con la excepción de *Fp13*) se observa una tendencia que apunta hacia la ya mencionada dicotomización de la muestra. Los datos de *(mín,máx)* de ***ER3*** comparten perfil con ***ER1***, en el sentido de que los máximos obtenidos por estimación para *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11* no son sustancialmente diferentes de los máximos que expresaron los alumnos en las subsiguientes actividades de aplicación, pero entre los mínimos correspondientes sí existe gran diferencia. La presencia simultánea de esta tendencia en ***ER1*** y ***ER3*** confirma la dicotomización de la muestra, aunque también señala que incluso los alumnos que activaron menos relaciones, realizaron un aprendizaje de las principales relaciones conceptuales termoquímicas. A la vista de estos datos, se revela como útil la estrategia que siguieron los estudiantes para reconstruir los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos a partir del análisis comparativo de los estados del sistema, aun no pudiendo recurrir en estos momentos de la intervención más que a modelos embrionarios de partículas y enlace químico, sin un modelo de reacción química aplicable a las características globales del proceso.

Las actividades que más ayudaron a activar relaciones de ***aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** son *Fp04* (aplicación), *Fp05* (exploración), *Fp06* (indagación), *Fp07* y *Fp14* (aplicación). Las que condujeron a una menor activación fueron *Fp01* y *Fp02*, junto con *Fp15*, cuyos bajos indicadores se deben a la baja asistencia de alumnos. Los valores de *f* y *R* correspondientes a *Fp01*, *Fp02*, *Fp03* y *Fp04* configuran una progresión creciente, cuyo máximo se alcanza en *Fp05*, lo que confirma que los conocimientos iniciales sobre la dinámica de los procesos eran escasos y fragmentarios. Ya se ha comentado que, a diferencia de lo que sucede con ***ER1*** y sobre todo ***ER2***, los problemas actitudinales que aparecieron hacia el final de la secuencia de actividades no afectan sustancialmente a los datos de ***ER3***. Así pues, los alumnos otorgaron un gran poder descriptivo e interpretativo a las relaciones que tratan los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, aunque no hay que olvidar que contaban con ayuda del profesor.

La dispersión de los datos a lo largo de las actividades muestra que la mayor consolidación de conocimientos se produjo entre las actividades *Fp01* y *Fp05*, en especial para los alumnos que más relaciones activaron. Entre *Fp07* y *Fp08* se observa una mejoría notable en la activación por parte de los alumnos de menor rendimiento, mientras que los alumnos de mayor rendimiento relajaron la tendencia a la activación de más relaciones; la transición a *Fp09* no produjo pérdidas importantes. En crecimiento de la dispersión entre *Fp12* y *Fp14*, debido a los obstáculos actitudinales no es tan desequilibrado como en ***ER1*** y ***ER2***.

En el siguiente apartado se discuten estas cuestiones sobre la base de los esquemas idiosincrásicos de los alumnos.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, se elaboraron los ***ER3*** idiosincrásicos de los alumnos, que después se clasificaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la *Tabla 14*, con la clave de símbolos ya declarada (*Tabla 9*, pág. 723).

Los niveles *p* de ordenación de los ***ER3*** idiosincrásicos son tres, de p_1 a p_3 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para p_1 y tres para p_3 (ver *Tabla 14*).

Tabla 15: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER3***, ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_3							p_2	p_1		
	p_{3c}		p_{3b}			p_{3a}			p_{1b}	p_{1a}	
ALUMNOS	Darío	Ana	Benito	Carlos	Clara	Adela	Alfonso	Berta	Brais	Débora	Diana
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	✓	✓	✓	·	·	✓*	·	✓	·	·	·
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante ΔH	✓	✓	✓	✓	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	✓
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✗	·	·
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·	✓
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	·	✓
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·	✓
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
VARIACIONES DE LAS MAGN. TERMOD. PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✗
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	✓	✓*	✓	✓*	✓	✓*	✗	✓	✗	✓	✓
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·	✗
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen ΔS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	·	·	✓	·	·	·	·	✓	✓	·	·
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO ($dG < 0$)	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" ($dG = 0$)	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO ($dG > 0$)	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·

Los esquemas ***ER3*** prototípicos de cada nivel se comentan a continuación.

Nivel $ER3_{Fp} = p_3$: subniveles $ER3_{Fp} = p_{3c}$, $ER3_{Fp} = p_{3b}$ y $ER3_{Fp} = p_{3a}$

$ER3_{Fp} = p_3$ es el nivel más acorde con la ciencia escolar, y en él se incluyen los esquemas de siete de los once alumnos de la muestra. Comprende tres subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{3c}, p_{3b} y p_{3a}:

Subnivel $ER3_{Fp} = p_{3c}$: esquema ***ER3*** de Darío, Ana y Benito

En este nivel se encuentran los dos esquemas de razonamiento más cercanos al referencial de la ciencia escolar, que son los de Darío y Ana. Estos dos alumnos activaron todos los subesquemas y variables relevantes para la resolución de las

cuestiones planteadas, solamente les quedaron las relaciones de la ***degradación de la energía*** con el ***rendimiento del proceso*** y el *trabajo útil*.

En cuanto a las dificultades para construir las ideas de la ciencia escolar, al comienzo de la fase previa Ana tuvo dudas sobre la variación de volumen de los sistemas que presentan sustancias en estado gaseoso: ¿aumenta el volumen del sistema porque el gas se expande, o hay un aumento de volumen porque el gas deja de formar parte del sistema mediante una transferencia de materia al entorno? También expresó cierta confusión entre la variable entalpía y la variación de la variable, ΔH, aunque en la actividad *Fp14* reconoció las variaciones de entalpía de combustión y de formación sin mayores problemas.

Los dos alumnos del nivel p_4 establecieron que los ***procesos termodinámicos***, como evolución de los sistemas materiales, suceden en un ***tiempo*** determinado y tienen un ***rendimiento*** concreto y un ***balance energético*** asociado. Expresaron los balances energéticos de los procesos propuestos en términos de la ***variación de entalpía***, y los clasificaron según su ***exotermia*** o ***endotermia*** en función del sentido de las transferencias de energía, atribuyendo la exotermia a la ***formación de interacciones*** en el sistema, y la endotermia a la ***ruptura de interacciones***. En los ***procesos químicos***, los cambios que suceden en la *composición química* se deben a los mecanismos de ***ruptura de interacciones*** y ***formación de interacciones***.

En cuanto al ***sentido de los procesos***, los esquemas que se activaron a lo largo de la fase previa son todavía embrionarios, porque no se construyeron las nociones de espontaneidad e irreversibilidad de los procesos, ni sus fundamentos microscópicos. Darío y Ana reconocieron que los procesos pueden tener lugar en uno de los dos ***sentidos*** posibles (sin distinguir todavía cuál de ellos es espontáneo en función del proceso y de sus condiciones, lo que se desarrollaría en la fase de intervención), y expresaron que la ***evolución del sistema*** en el sentido en que sucede el proceso se puede expresar mediante las ***variaciones de las funciones de estado***. Utilizaron adecuadamente las ***variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas*** para describir los cambios en el estado de los sistemas y para vincularlos a los procesos energéticos de ***calor*** y ***trabajo*** (*Esquema* ***ER2***: ***Procesos termodinámicos***, pág. 731), y construyeron los significados de las ***variaciones de las magnitudes termodinámicas principales*** ΔU y ΔH: reconocieron que los sistemas experimentan cambios en la energía debido a las transferencias por calor y trabajo, y cuantificaron mediante la variación de entalpía del sistema los intercambios energéticos por calor a presión constante. Asociaron la entalpía a la cantidad de energía implicada en los procesos microscópicos de ruptura y formación de interacciones químicas y al cambio en la estabilidad de las mismas, aunque los modelos de enlace químico que se hicieron explícitos eran todavía fragmentarios.

[Ana, Fp14(2)]:

- Ó tipo de enlaces que hai nos compostos, xa que dependendo de se é simple, doble ou triple necesítase máis enerxía par rompelos.

- Os productos resultantes na combustión (nº de moles de auga e de dióxido de carbono en cada composto).

- Na formación dos enlaces da agua e da do dióxido de carbono libérase enerxía. (…)

Subnivel $\boldsymbol{ER3}_{Fp}$ = p_{3b}: esquemas ***ER3*** de Carlos y Clara

La única diferencia entre los esquemas de Carlos y Clara con respecto a los del subnivel p_{3c} es que estos dos alumnos no activaron la relación que declara el *tiempo del proceso* como una característica de los procesos termodinámicos. Además, se presentaron más dificultades para construir las ideas de la ciencia escolar:

Carlos tardó en conceptualizar la entalpía como una función de estado del sistema y en diferenciar la entalpía de la variación de entalpía, debido a la falta de esfuerzo cognitivo que realizó al respecto. En la actividad de aplicación *Fp05* se presentó al alumnado la variación de entalpía como la variación de una función de estado equivalente a la energía intercambiada por calor a presión constante, y la única respuesta que anotó Carlos sobre la explicación del profesor fue:

[Carlos, Fp05(x)]: Comprendín o cambio e a gran diferenza que se produce ao efectuar dous procesos iguais en sistemas abertos e pechados, xa que a presión xoga un factor decisivo

Tamén entendín porque usando certos reactivos a cantidade de productos obtida e menor.

En la actividad *Fp07*, no hizo mención de la variación de entalpía, en *Fp08* calculó el calor implicado en la ecuación y lo llamó también "variación de energía" (idea adecuada, porque en la disolución del hidróxido de sodio en agua a temperatura ambiente apenas se realiza trabajo por evaporación del agua de la disolución), y apenas respondió a *Fp09*. En *Fp12*, sus manifestaciones escritas sobre la variación de entalpía se reducen a:

[Carlos, Fp12(1)]: $\Delta H^{\circ}_{r} = \Sigma\Delta H_{P} - \Sigma\Delta H_{f}$ R

Que cada un deles ten unha pequena variación na entalpía

Después de la intervención del profesor, realizó una nueva anotación, cuando menos llamativa porque no había realizado cálculo alguno:

[Carlos, Fp12(x)]: Chamoume a atención o feito de que por non ter en conta o calorímetro os meus cálculos eran erroneos

En *Fp13*, se limitó a copiar los cálculos de su compañera Clara y no elaboró el diagrama entálpico, y su respuesta a *Fp14* también es escueta y en buena parte copiada de las ideas que se anotaron en la pizarra durante el debate en gran grupo de clase, en el que apenas participó. Sobre los aspectos energéticos de la ruptura y formación de enlaces químicos, escribió:

[Carlos, Fp14(2)]: Débese aos diferentes elementos que compoñen cada substancia e o nº de moles

Tamén depende dos enlaces e da sía formación e ruptura:

Coa formación de enlaces(C–O / O–H) desprendese enerxía e coa ruptura de (C–H / C–C / O=O / C≡C) absorvese enerxía

En cuanto a las dificultades a las que se enfrentó Clara, su compañera de grupo en G_C, al principio de la secuencia de actividades tuvo que superar varios obstáculos para construir un esquema macroscópico adecuado sobre el balance energético de los procesos termodinámicos. Se sentía insegura sobre el significado de la variación de energía interna, y aunque pareció comprender mejor la variación de entalpía como "el calor a presión constante", le costó llegar a expresar los balances energéticos de los procesos utilizando las variaciones de entalpía. Aceptada la idea de que todo proceso tiene un balance energético cuyo resultado depende del sentido global de las transferencias de energía del sistema, comenzó a visualizar las liberaciones de energía al entorno; para representar gráficamente los niveles de energía de los estados inicial y final, la clasificación endotérmico /exotérmico y la dificultad para establecer una escala de valores de la entalpía la confundieron. Por lo demás, hizo suyo el modelo microscópico sobre los aspectos energéticos de las rupturas y formaciones de enlaces químicos, que puso en juego en *Fp14*. Al final de la secuencia *Termoquímica*, teniendo en cuenta el conflicto cognitivo que mantenía sobre las transferencias de energía por calor, quedó por confirmar si la construcción de las relaciones microscópicas impulsarían la superación de las ideas alternativas de Clara. Sus resultados de la fase previa indican que si el esquema ***ER3*** de Clara se afianzase con la realización de las siguientes actividades, ella podría elaborar interpretaciones significativamente más avanzadas que las iniciales.

Por su parte, Benito activó una relación a mayores de las de Darío y Ana: reconoció que es la degradación de la energía la que limita el trabajo útil que puede realizar un sistema. Sin embargo, no vinculó adecuadamente la evolución del sistema con el rendimiento del proceso, por considerar que se trata del desempeño que demuestra el sistema aun sin cambiar de naturaleza.

Al comienzo de la fase previa, tuvo dificultades para construir el concepto de variación de energía interna, porque aunque afirmaba que los sistemas tienen una cantidad de energía debida la naturaleza corpuscular, creía que la "energía interna" consiste en una cantidad de energía que se transfiere desde un entorno remoto y que se almacena en él (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp04: el móvil perpetuo de primera especie*, pág. 617). Después de la intervención del profesor y la reflexión en pequeño grupo, empezó a transferir adecuadamente la energía interna, y completó sus conocimientos sobre la energía de los sistemas hasta el punto de hacer útiles los conceptos macroscópicos de conservación y degradación de la energía y el modelo microscópico de los aspectos energéticos de la ruptura y formación de enlaces químicos, que ya desarrolló desde las primeras actividades. Construyó balances de energía entre el sistema y el entorno aun en sistemas abiertos, aunque con el conflicto conceptual sobre la naturaleza del calor y el trabajo (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp15: "¿quemando calorías?"*, pág. 698).

Subnivel $\boldsymbol{ER3}_{Fp} = p_{3a}$: esquemas ***ER3*** de Adela y Alfonso

En el esquema de razonamiento de Adela se activaron los mismos elementos que en los ***ER3*** de los alumnos del subnivel p_{3c}; las diferencias consisten en una relación alternativa y dificultades para construir otras cuatro relaciones de la ciencia escolar, y prácticamente todas giran en torno al mismo obstáculo: la confusión entre una magnitud y la diferencia de magnitud.

Este problema se manifestó por primera vez en la actividad *Fp08*, después de que Adela expresara los valores de temperatura inicial y final del sistema en unidades de ºC, y obtuviera ΔT de manera adecuada. A la hora de aplicar este valor en la expresión del calor involucrado en la reacción calorimétrica, recordó que las unidades internacionales de la temperatura son el Kelvin, y para "pasar" de ºC a Kelvin los valores con los que trabajaba, sumó 273 a la diferencia de temperatura que había obtenido en ºC. Hasta la intervención del profesor no se percató ni del absurdo de que el incremento de temperatura del sistema durante la calorimetría fuera de 277 K, ni siquiera de que sus cálculos arrojaban un resultado diferente al de sus compañeros, y cuando Rodrigo ayudó a poner en común los resultados, expresó sus dudas sobre el acierto de sus cálculos:

[Adela]: Pero yo no sé si me va mal, porque sólo puse la masa del NaOH. Y había que poner también la masa del agua, ¿no?

Reflexionando un momento sobre sus cálculos, sospechó que no solamente se había equivocado al tomar la masa de una sustancia en lugar de la de todo el sistema, y preguntó:

[Adela]: ¿Pero la temperatura no tiene que estar en Kelvin?

A pesar de que Rodrigo le explicó por qué la conversión de unidades se realiza sobre los valores de temperatura y no sobre la variación de temperatura, a

Adela no le pareció convencer esta intervención, porque solamente corrigió el valor de masa y dejó la variación de temperatura *convertida* a K. Su compañero de grupo, Alfonso, copió los cálculos de Adela irreflexivamente, a pesar de que por escrito dejó claro que la diferencia entre las temperaturas inicial de final era de 4 ºC. En la actividad siguiente, Adela volvió a expresar la misma idea alternativa, y de nada sirvió que el profesor le recordase cómo realizar la conversión de unidades.

La confusión entre una magnitud y su variación volvió a manifestarse cuando Adela tuvo que relacionar la variación de entalpía de dos procesos a presión constante para cuantificar la cantidad de energía transferida por calor en un tercer proceso relacionado con los otros dos (*Fp13*). En reunión con Ana y Alfonso, intercambiaron impresiones sobre qué valores tenían que representar en el diagrama entálpico, e identificaron los datos correspondientes a los distintos estados, a los que llamaban indistintamente "entalpías" y "delta-haches", hasta que se dieron cuenta de que no se ponían de acuerdo. Rodrigo se acercó a ellos y les explicó la diferencia entre la entalpía y su variación, y les ayudó a construir el diagrama entálpico. A partir de entonces, las manifestaciones de Adela no contienen más expresiones inadecuadas a este respecto. Sin embargo, desde el punto de vista del análisis hemos decidido no dar por superada en este fase de la intervención la relación inadecuada sobre la variación de temperatura, porque el cambio desde este tipo de ideas hacia las de la ciencia escolar es lento y difícil, y las ideas que se llegan a aplicar a una magnitud no tienen por qué transferirse a otra, sobre todo si los alumnos tienden a utilizar mecanismos de razonamiento basados en el sentido común y aplican de manera poco reflexiva reglas no científicas que les permiten simplificar las relaciones causales y las variables objeto de estudio. Sí consideramos superada la relación alternativa sobre ΔH, porque Adela puso en juego la idea de la ciencia escolar en varias ocasiones después de la intervención del profesor.

Los razonamientos iniciales de Adela sobre los valores numéricos de las magnitudes físicas y sobre la naturaleza de las mismas eran bastante pobres. Ya se han comentado las dificultades que tuvo para adaptar los valores de entalpía al eje de ordenadas, debido a problemas de comprensión relacionados con los números negativos; y al principio de la intervención le costaba relacionar el cambio en la temperatura de ebullición del agua con una diferencia en las condiciones de presión, y prefería considerar que la temperatura de ebullición era la misma que a presión ambiente, pero se alcanzaba en menos tiempo. En la primera sesión de la fase previa, varios alumnos manifestaron una tendencia a atribuir los fenómenos poco predecibles a ciertos cambios "bruscos" o "rápidos" en las condiciones del medio, que a su vez causan variaciones extremas en las funciones de estado y generan comportamientos poco predecibles en los sistemas materiales. Con el desarrollo del debate en pequeño grupo y la intervención del profesor, solamente Adela continuó sosteniendo esta idea, que se manifestaría en debates posteriores. En los razonamientos iniciales de varios de sus compañeros, la ausencia de un agente

causal claro parecía suplirse apelando a la elevada velocidad de las transformaciones, pero para Adela, casi todo cambio es *cuestión de tiempo*: en algunos casos, las magnitudes varían por influencia de otras, pero por lo general tienden a variar a medida que pasa el tiempo, sin motor de cambio definido ni condiciones o velocidades extremas que impulsen mecanismos de transformación.

En cuanto al esquema de Alfonso, no activó la relación ***A01***, sobre el tiempo en el cual transcurren los procesos termodinámicos, y, a diferencia de Adela, no llegó a diferenciar la entalpía de la variación de entalpía.

[Alfonso, Fp12(1)]: (…) Hai pequenas diferencias entre as ~~temper~~ entalpias de cada un dos grupos, que se debe a que cada un ten unha ∆temperatura diferente

A diferencia de los expertos, que a veces cometen abusos de lenguaje para simplificar la expresión, Alfonso demuestra que no diferencia la entalpía de la variación de entalpía, porque manifiesta que la cantidad de energía intercambiada por calor, para él "la entalpía", no era la misma en todas las experiencias. Denomina "cambio" a la divergencia de resultados entre unos grupos, lo que revela que no ha construido el concepto de variación o diferencia de valores entre dos estados, o bien lo confunde con la diferencia entre valores asociados a procesos diferentes:

[Alfonso, Fp12(x)]: (…) aínda que ó principio a energía non era a mesma coa mesma variación nuns grupos, cambiou debido a un erro de calculo

En sus respuestas a las actividades de la fase previa, Alfonso no reveló que tuviera grandes dificultades en construir las demás relaciones de ***ER3***.

ER3$_{Fp}$ **=** p_2**: esquema *ER3* de Berta**

Esta alumna no activó las relaciones ***A07***, ***A09***, ***A10***, ***A11*** y ***A26***, mediante las cuales se construye un modelo microscópico de los aspectos energéticos de las reacciones químicas. Desde las primeras actividades, cuando surgió en el debate en gran grupo la conveniencia de introducir ideas del dominio microscópico para interpretar los cambios sucedidos en los sistemas propuestos, Berta evitó la aplicación de los modelos de partículas y enlace, probablemente por sentirse insegura de sus conocimientos. Cuando se vio en la necesidad respaldar su afirmación de que el proceso que sucede al mezclar Zn y HCl es una reacción química, recurrió a pruebas de tipo fenomenológico:

[Berta, Fp03(1)]: (…) mentres os dous compostos forman unha reacción, feito que observamos porque burbullean de forma semellante que cando fervemos auga.

Dentro del dominio macroscópico de representación del conocimiento, no tuvo grandes dificultades para elaborar los razonamientos representativos de la ciencia escolar sobre los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos.

Nivel $ER3_{Fp} = p_1$: subniveles $ER3_{Fp} = p_{1b}$ y $ER3_{Fp} = p_{1a}$

Este nivel comprende dos subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{1b} y p_{1a}. En él se encuentran los niveles de Brais, Débora y Diana

Subnivel $ER3_{Fp} = p_{1b}$: esquema ***ER3*** de Brais

Brais no hizo referencia al tiempo que duran los procesos termodinámicos, y no construyó parte del modelo microscópico del balance energético, al no considerar que las reacciones químicas involucran la formación de enlaces químicos. En la literatura del área se ha descrito cómo algunos estudiantes interpretan las reacciones químicas como procesos que consisten en la fragmentación microscópica de los reactivos para generar los productos, sin atender a la formación de interacciones químicas nuevas. En la muestra objeto de investigación, los alumnos correspondientes a los niveles iniciales $ER3p_2$ y $ER3p_1$ compartían hasta cierto punto este modelo alternativo, porque no citaron en ningún momento la formación de enlaces químicos en las reacciones, a pesar de que, tanto en *Fp03* como en *Fp14*, durante el debate en gran grupo estas ideas se discutieron en voz alta y se anotaron en la pizarra.

Brais dejó en blanco el apartado correspondiente a la variación de entalpía de enlace, así que tampoco hizo explícito que la variación de entalpía asociada a un proceso químico se puede estimar como el balance global de los aspectos energéticos asociados a la ruptura y formación de interacciones. Anteriormente, en *Fp03*, había expresado la idea alternativa de que la ruptura de enlaces trae consigo una liberación de energía, a pesar de que, en su grupo, Benito había manifestado las ideas de la ciencia escolar:

[Brais, Fp03(1)]: (…) Ao liberar gas provócase o burbulleo e a rotura dos enlaces provoca o desprendemento de calor en forma de enerxía.

Tampoco superó sus dificultades para establecer la diferenciación conceptual entre la entalpía y su variación. Así, en *Fp14* atribuía a los reactivos y los productos de las reacciones de combustión un valor de "entalpía" y no de ΔH_f.

Subnivel $ER3_{Fp} = p_{1a}$: esquemas ***ER3*** de Débora y Diana

Aunque en las respuestas de Débora no se aprecian grandes dificultades en la construcción de las relaciones que activó, recordemos que esta alumna dejó de asistir a las sesiones de la materia de Química después de *Fp07*. Dado que en las actividades que realizó no utilizó ninguna relación sobre las interacciones químicas, hemos inferido que Débora no había aprendido un modelo de enlace acorde con la ciencia escolar. Parece que su conocimiento del modelo microscópico era muy pobre, porque sus ideas sobre el modelo de partículas eran fragmentarias y poco consistentes, como se observa en sus manifestaciones correspondientes a *Fp01* y

Fp03. Débora explica la ebullición del agua de la siguiente manera: con los cambios de temperatura el agua hierve pero se desnaturaliza, así que el burbujeo es debido a la ebullición… de oxígeno (¿?). En cuanto a la reacción entre el zinc y el ácido clorhídrico, para ella se trata de un a fusión del zinc provocada por la acción del ácido sobre el metal. En el motor perpetuo, los gases hidrógeno y oxígeno generan una molécula de agua, capaz de realizar trabajo (¡!):

[Débora, Fp01(1)]: (…) O auga volve a ferver. (…) Cos cambios de temperatura as moléculas de auga desnaturalízanse e fórmanse as burbullas a causa da ebullición de osíxeno.

[Débora, Fp03(1)]: (…) a granalla de zinc pasa de estado sólido a líquido o añadir o ácido clorhídrico. (…)

[Débora, Fp04(1)]: (…) o osíxeno gaseoso e o hidróxeno gaseoso reaccionan e dan lugar a unha molécula de auga (…)

Además de no activar relaciones del dominio microscópico en ***ER3***, tampoco aludió al tiempo en el que transcurren los procesos ni a la limitación del trabajo útil, que viene dada por la degradación de la energía. Cuando dejó de asistir a las clases estaba empezando a consolidar el signficado del trabajo como proceso de transferencia de energía, y su inasistencia dificultaría el posterior seguimiento de sus ideas. En todo caso, el esquema ***ER3*** inicial de Débora contiene varias de las relaciones macroscópicas más importantes para la interpretación de los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos.

Por su parte, Diana tampoco activó en su esquema las relaciones sobre el tiempo que duran los procesos termodinámicos y el fundamento teórico del trabajo útil (recordemos que el elemento *trabajo útil* no figura en su ***ER2***); tampoco completó el modelo microscópico sobre el balance energético de los procesos, porque no hizo explícito que la ruptura de interacciones es un proceso endotérmico; sin embargo, justificó que la exotermia de las reacciones de combustión de *Fp14* se debe a la formación de los enlaces que permiten generar los productos H_2O y CO_2. Al no reconocer la endotermia de las rupturas de interacciones, no relacionó la variación de entalpía de enlace con la con la energía involucrada en romper el mismo, sino con la energía que se libera cuando el enlace se forma. La otra idea alternativa que presenta su ***ER3*** está en que no reconoció el rendimiento de los procesos (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp04: el móvil perpetuo de primera especie*, pág. 617).

Esquema *ER4: Dinámica de los procesos químicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento de *Dinámica de los procesos químicos* que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 16* recoge las variables, los subesquemas y las relaciones que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento *Dinámica de los procesos químicos* de los alumnos, y se indica la frecuencia de activación ***f*** y el código ***Cód*** de identificación las relaciones de ***ER4***, representadas por el símbolo ***D***.

Tabla 16: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Dinámica de los procesos químicos (ER4)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	124	*D01*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	122	*D02*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	132	*D03*
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	63	*D04*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	25	*D05*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	34	*D06*
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	41	*D07*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	39	*D08*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	131	*D09*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	76	*D10*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	16	*D11*
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	16	*D12*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	62	*D13*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	8	*D14*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	27	*D15*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	62	*D16*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D17*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D18*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	0	*D19*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D20*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D21*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D22*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D23*
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D24*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D25*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D26*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D27*
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	0	*D28*
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	0	*D29*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D30*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	14	*D31*
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D32*

TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D33*
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	0	*D34*
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D35*
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D36*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	1	*D37*
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	1	*D38*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	0	*D39*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	0	*D40*
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	0	*D41*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	0	*D42*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	1	*D43*

ER4 esquematiza la construcción de una visión científica de las disciplinas que componen la Dinámica de los procesos físicos y químicos. De las 43 relaciones que componen el esquema referencial, los alumnos de la muestra activaron 20, y las relaciones que aparecen con mayor frecuencia son las que definen la Termoquímica como la parte de la Termodinámica que se encarga de estudiar los aspectos energéticos de los procesos químicos, y la Termodinámica Química como la parte de la Termodinámica que analiza los aspectos dinámicos de los procesos atendiendo a la evolución de los sistemas y sus causas. También tienen elevada frecuencia de activación las relaciones que se refieren a las leyes de la Termoquímica y al primer principio de la Termodinámica, cuyo fundamento teórico es la conservación de la energía en los sistemas materiales. Apenas se activan las relaciones sobre la Cinética Química y el Equilibrio Químico. El único concepto cinético que se utilizó es el tiempo, y en cuanto al equilibrio, solamente citaron una vez el equilibrio térmico. Estos datos indican que los alumnos ciñeron sus razonamientos al ámbito de la Termodinámica Clásica, sin entrar apenas en las demás disciplinas de la Dinámica.

De las 23 relaciones que no utilizaron durante la fase previa, solamente hay una de la que se esperaba un resultado positivo: la que enuncia que la velocidad de los procesos físicos y químicos no se estudia en el ámbito de la Termodinámica. Estos datos permiten afirmar que las actividades de *Termoquímica* han tenido éxito en la construcción de esquemas de razonamiento adecuados sobre la concepción de la Termoquímica como disciplina científica.

El esquema de razonamiento ***ER4*** presenta seis relaciones que tienen alguna vinculación con el dominio microscópico de representación del conocimiento, y el resultado esperable para ellas es la no activación, porque una tiene que ver con el tercer principio de la Termodinámica, dos con los aspectos probabilísticos que introducen la Termodinámica Estadística, otras dos con la catálisis, y la sexta establece la intervención de la temperatura absoluta en la ecuación fundamental de la Termodinámica Química. No se activaron ninguna de las seis, como era de prever. Las 37 relaciones macroscópicas tienen un valor de $f_{(macro)} = 997$, con promedio de activación $\bar{x}_{(macro)} = 27$ y una desviación típica $\sigma_{(macro)} = 42$. La baja frecuencia de activación y la elevada dispersión de los datos se explican porque la mitad de las relaciones se encuadran en el ámbito de la Termodinámica Química, disciplina poco divulgada fuera de las aulas y no estudiada por los alumnos de la muestra en el entorno académico antes de la fase previa. Sólo 3 relaciones eran

conocidas para los estudiantes. Los parámetros de activación correspondientes son $f_{(no\ nuevas)} = \mathbf{14}$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = \mathbf{5}$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = \mathbf{8}$. Los resultados de las 40 relaciones nuevas son: $f_{(nuevas)} = \mathbf{983}$, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)} = \mathbf{25}$, y $\sigma_{(nuevas)} = \mathbf{41}$.

En la *Tabla 17* se recoge información sobre la activación de las relaciones de *Dinámica de los procesos químicos*, para cada una de las 15 actividades de la unidad.

Tabla 17: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Dinámica de los procesos químicos*** *(**ER4**) en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	24	8	5	(0,4)
Fp02	*77*	*11*	*7*	*(7,7)*
Fp03	48	11	9	(2,9)
Fp04	98	11	12	(6,11)
Fp05	76	10	8	(0,8)
Fp06	*110*	*11*	*10*	*(10,10)*
Fp07	50	11	11	(3,11)
Fp08	40	10	4	(4,4)
Fp09	62	10	7	(0,7)
Fp10	*36*	*6*	*6*	*(6,6)*
Fp11	*66*	*6*	*11*	*(11,11)*
Fp12	90	10	12	(6,12)
Fp13	100	10	10	(10,10)
Fp14	92	10	10	(7,10)
Fp15	28	4	7	(0,7)

El número de alumnos que realizaron las actividades varió entre los 11 se presentaron a las actividades *Fp01 – Fp07*, y los 10 que asistieron a las demás, con las excepciones de *Fp10* y *Fp11* (6 alumnos) y *Fp15* (5 alumnos). Al ausentarse reiteradamente Débora, la muestra, que inicialmente tenía 11 individuos, pasó a contar con 10 a partir de *Fp08*.

Además de las 2 actividades de *Termoquímica* en las que uno de los estudiantes dejó en blanco su guion de trabajo (Diana en *Fp05*, Brais en *Fp15*), hay otras dos actividades en las que no todos los estudiantes activaron relaciones de ***ER4***: se trata de *Fp01* y *Fp09*.

Comparando los resultados de ***ER4*** con los esquemas ya comentados, se observa que la activación de ***Dinámica de los procesos químicos*** es inferior a la de ***ER1***, ***ER2*** y ***ER3***. Al comparar solamente las actividades de indagación, para las cuales los indicadores *f*, *R* y *(mín, máx)* son estimaciones de la cantidad de relaciones deseables, se observa que esta diferencia se debe a la naturaleza de ***ER4***: la fase previa sólo cubre aproximadamente la mitad de las relaciones de este esquema.

Las frecuencias de activación correspondientes a las actividades de exploración y aplicación indican que el impacto de la aplicación de *Termoquímica* se percibió casi desde las primeras actividades, y solamente se produjo un bajo

rendimiento en *Fp8*, la primera actividad de cálculos sobre la variación de entalpía. Los datos de las actividades de aplicación indican que se activaron todas o prácticamente todas las relaciones tratadas en las actividades de indagación.

Para aquellos alumnos que experimentaron una mejora de sus esquemas ***ER4***, la activación de relaciones a lo largo de la secuencia de actividades experimenta un rápido crecimiento inicial en *R* y *f* hasta la zona de *Fp04* a *Fp06*, y desde entonces se produce una disminución irregular en el número y frecuencia de las relaciones activadas, a la que sigue un repunte en desde *Fp11*. A partir de entonces, no se observan las pérdidas debidas a los problemas actitudinales que ya se han comentado en apartados anteriores, salvo en el caso de *Fp15*. Este perfil revela que los estudiantes avanzaron en la activación de relaciones de ***ER4***, con un estancamiento entre *Fp07* y *Fp09*), porque en estas actividades sobre calorimetría los alumnos volcaron todos sus esfuerzos en trabajar solamente con los conceptos y procedimientos que permiten estudiar los intercambios energéticos, y hubo que esperar a *Fp12* para que algunos alcanzaran la consolidación de las relaciones tratadas hasta el momento (los valores de las duplas así lo indican).

No todos los alumnos alcanzaron buenos esquemas de razonamiento, como indican los amplios intervalos que cubren las duplas *(mín,máx)* en la mayoría de las actividades: existió una dicotomización de la muestra no relacionada con los obstáculos actitudinales, sino con dificultades en la integración de conocimientos de diferentes ámbitos; las excepciones están en las actividades *Fp08* y *Fp13*, en las que los alumnos se centraron más en realizar los cálculos y pusieron en juego el mismo tipo de conocimientos en una extensión que no parece significativamente diferente unos de otros.

En general, los valores máximos de las duplas coinciden en muchas de las actividades con el número total *R* de relaciones activadas, lo que indica que la secuencia *Termoquímica* ayudó a algunos estudiantes a activar esquemas de razonamiento acordes con las ideas de la ciencia escolar; sin embargo, los datos no permiten afirmar con seguridad que las actividades tuvieron éxito en su conjunto en la evolución de los esquemas iniciales del alumnado sobre la Dinámica de los procesos físicos y químicos.

Los alumnos que construyeron esquemas ***ER4*** menos completos eran aquéllos que partían de un menor nivel de conocimientos científicos y sobre la Ciencia, y se enfrentaron a bastantes dificultades en el aprendizaje de conceptos y procedimientos; al comienzo de la fase previa, estos alumnos mantenían una visión bastante limitada de los constructos de los que se vale la Dinámica para estudiar los procesos físicos y químicos.

Promovieron mejor activación de relaciones las actividades de aplicación *Fp04*, *Fp07*, *Fp12* (aunque las actividades de aplicación después de *Fp12* mantienen un buen nivel de activación). Aunque *Fp04*, *Fp07*, *Fp12* no son las de mayor eficacia

en la activación de ***ER1***, ***ER2*** y ***ER3***, se observa que las actividades inmediatamente anteriores a éstas sí generaron una gran utilización de relaciones de los demás esquemas de razonamiento, lo que explica el éxito de *Fp04*, *Fp07* y *Fp12* en la construcción de ***ER4***: después de consolidar nuevos conocimientos conceptuales y procedimentales, los alumnos ampliaron sus visiones sobre la Dinámica de los procesos físicos y químicos con las actividades de aplicación.

Las actividades que condujeron a una menor activación de relaciones fueron *Fp01* (la primera y, por lo tanto, aquélla en la que los estudiantes no habían interaccionado aún con la propuesta de enseñanza de manera significativa), *Fp08* (la primera actividad sobre cálculos calorimétricos) y *Fp10* (ésta, de indagación) además de *Fp15*, cuya baja asistencia justifica sus bajos indicadores de activación.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Dinámica de los procesos químicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER4*** de los alumnos, que se categorizaron en los niveles y subniveles que se muestran en la *Tabla 18*, con la clave de símbolos ya presentada en la *Tabla 9* (pág. 723).

Los niveles *p* de ordenación de los ***ER4*** idiosincrásicos son cuatro, de p_1 a p_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para los niveles p_2 y p_1 (ver *Tabla 18*).

Tabla 18: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER4***, ***Dinámica de los procesos químicos***, *idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_4	p_3						p_2		p_1	
								p_{2b}	P_{2a}	p_{1b}	p_{1a}
ALUMNOS	**Adela**	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Berta**	**Clara**	**Darío**	**Diana**	**Carlos**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓			
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	·	✓	✓	✓	✓	·	·	✓			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMOD. ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	✓	·	·	·	·	·	·	·			

A continuación se describen los esquemas ***ER4***, comentando las características por las que se categorizaron en los niveles $\boldsymbol{ER4}_{Fp} = [p_1, \ldots, p_4]$.

Nivel $ER2_{Fp} = p_4$: esquema de Adela

Adela activó todos los elementos que se pretendían construir hasta este momento de la intervención, salvo la variable *velocidad del proceso*, aunque ésta no es termodinámica y no es objetivo de la secuencia de actividades de la fase previa. De la Termoquímica, reconoció las leyes de ***Lavoisier-Laplace*** y ***Hess***, así como la

ecuación fundamental que vincula la variación de la energía interna del sistema con las transferencias de energía *calor* y *trabajo*. En cuanto a la Termodinámica Química, Adela demostró que conocía el concepto de *equilibrio térmico*, base del ***principio cero***, y la ***conservación de la energía***, a la que aludió en varias ocasiones a lo largo de la secuencia de actividades. Activó este elemento para explicar la imposibilidad del ***móvil perpetuo de primera especie*** y para dar sentido a las ***leyes de la Termoquímica*** y al ***primer principio de la Termodinámica***.

Sobre la conservación de la energía en el universo, un ejemplo extraído de las manifestaciones de esta alumna es:

[Adela, Fp03(x)]: Como la energia ni se crea ni se destruye solo se transforma, podemos decir que la energía puede pasar del sistema al entorno o viceversa pero nunca saldrá del universo.

Sobre el equilibrio térmico:

[Adela, Fp07(x)]: Para mezclar dos masas a ≠ temperaturas obtenemos una temperatura media. (…)

Adela no presentó grandes dificultades en la construcción de las relaciones de la ciencia escolar, y su colaboración con Ana (sobre todo) y con Alfonso en el trabajo diario de aula ayudó a los tres a sistematizar sus observaciones y organizar sus conocimientos sobre la naturaleza de la Ciencia. En su interacción dentro del grupo G_A, Adela era quien más ideas aportaba en voz alta, mientras que Ana, más tímida y un poco temerosa de cometer errores en público, prefería desarrollar las ideas antes de darlas a conocer. La participación de Ana en el debate fue mejorando con el tiempo desde las primeras sesiones, y, según los docentes entrevistados, su inicial resistencia a la participación en el aula se debe a su carácter introvertido y a la necesidad de mantener ante profesores y compañeros su *status* social de chica estudiosa y trabajadora. El tercer alumno de G_A, Alfonso, tenía momentos de gran comunicatividad, pero en general prefería hablar menos que sus compañeras y ayudarles a desarrollar las ideas que surgieran en el debate. El carácter cooperativo de las relaciones en G_A funcionó adecuadamente en la elaboración de conocimientos sobre la naturaleza de la disciplina objeto de estudio, dado que los tres alumnos de este grupo se encuentran en los primeros niveles de ordenación de los ***ER4***, con esquemas completos que contienen las ideas de la ciencia escolar. Recordemos que Ana y Alfonso son alumnos considerados "los más estudiosos de la clase" por parte de los profesores, pero Adela padecía una enfermedad metabólica que dificultaba su aprendizaje, y a pesar de ello logró alcanzar un aprendizaje perfectamente equiparable al de sus compañeros.

Nivel $ER4_{Fp} = p_3$: esquemas de Ana, Alfonso, Brais, Benito, Berta y Clara

Este nivel está representado por seis esquemas idiosincrásicos idénticos, los de Ana y Alfonso (G_A), Brais, Benito y Berta (G_B) y Clara. Todos estos alumnos activaron exactamente las mismas relaciones.

Con respecto al esquema de Adela, que es el ***ER4*** más completo desde el punto de vista de la ciencia escolar, el esquema de estos seis estudiantes presenta pocas diferencias: no activaron el elemento *equilibrio térmico*, aunque es posible que lo conocieran, a juzgar la seguridad que demostraron en la medida de la temperatura final en los dos experimentos de calorimetría. Al no disponer de manifestaciones escritas ni orales directas que respalden esta suposición, hemos asignado por defecto la no activación a este elemento y sus relaciones.

La unanimidad de relaciones de los seis alumnos de p_3 muestra un patrón claramente grupal: Ana y Alfonso pertenecen a G_A, y Brais, Benito y Berta, a G_B; Clara es la única integrante del grupo G_C que está en el nivel p_3, con un esquema ***ER4*** más completo que el de su compañero Carlos. Recordemos que Clara, cansada de que Carlos llegara tarde y colaborara poco en el trabajo diario, estableció interacciones estables con los grupos G_A y G_D.

La dinámica interna del grupo G_B presentó varias tensiones:

Al principio, la colaboración dentro del grupo fue buena, pero Brais no se sentía cómodo hablando cara a cara con Berta. Por sus reacciones a las intervenciones de su compañera, parece que en algunas ocasiones Brais se sentía un poco intimidado por la seguridad con la que Berta emitía algunos juicios con los que él no estaba de acuerdo, pero que no estaba seguro de poder refutar; y cuando era Berta la que no tenía claras sus ideas, tendía a pedir a Benito o Brais que las confirmasen, lo que parecía presionar más a éste. Con el tiempo, Brais pasó a la defensiva y, cuando Berta aventuraba ideas sobre que él no era capaz de argumentar a favor o en contra, tendía a responder con burlas. Berta empezó respondiendo con desdén o aspereza, y con el tiempo prefirió colaborar solamente con Benito; pero éste, muy participativo en los debates en gran grupo, no se encontraba a gusto en el ambiente creado por sus compañeros. Cuando, a medida que pasaron las sesiones, Benito se percató de que ellos preferían copiar las ideas de sus guiones de trabajo en vez de contribuir al trabajo grupal, optó por marcar las distancias, aunque siempre educadamente. Estos problemas dentro del grupo G_B, que comenzaron a manfiestarse en *Fp05* y no fueron determinantes hasta *Fp14*, no afectaron significativamente a la construcción de un esquema ***ER4*** acorde con las ideas de la ciencia escolar.

Nivel $ER4_{Fp} = p_2$: subniveles $ER4_{Fp} = p_{2b}$ y $ER4_{Fp} = p_{2a}$

Este nivel comprende los subniveles p_{2b} (más acorde con la ciencia escolar) y p_{2a}, cada uno de ellos representado por un esquema idiosincrásico: $ER4_{Fp} = p_{1b}$, por el

esquema ***ER4*** de Darío, y ***ER4***$_{Fp}$ = p_{1b}, por el de Diana, que solamente se diferencia del de su compañero en la no activación de la relación ***D12***; hemos clasificado el esquema de Diana en un subnivel distinto, porque precisamente ***D12*** es la única relación de Cinética Química que activaron los alumnos durante la fase previa, y todos salvo Diana la utilizaron en sus manifestaciones.

Ni Darío ni Diana activaron el elemento *equilibrio térmico*. Él hizo uso de un concepto cinético, el tiempo del proceso, pero ella no activó el subesquema ***Cinética Química***. Además, ninguno de los dos aceptó la imposibilidad del ***móvil perpetuo de primera especie*** basándose en la ***conservación de la energía***, a pesar de que sí reconocían que la energía no se crea ni se destruye. El conflicto conceptual de Darío sobre el trabajo parece la responsable de esta idea, que Diana tomó de su compañero:

[Darío, Fp04(2)]: Que o comprara, porque se o motor consume máis cantidade de enerxía do traballo que produce, non sae rentable.

[Diana, Fp04(2)]: Que a compre porque xera máis traballo da enerxía que consume.

Nivel *ER4*$_{Fp}$ = p_1: subniveles *ER4*$_{Fp}$ = p_{1b} y *ER4*$_{Fp}$ = p_{1a}

Este nivel contiene los subniveles p_{1b} y p_{1a}, representados, cada uno, por uno de los dos esquemas más alejados de las ideas de la ciencia escolar: el ***ER4*** de Carlos (p_{1b}) y el ***ER4*** de Débora (p_{1a}).

Los alumnos del nivel p_1 no utilizaron los principios cero y primero de la Termodinámica. Como no utilizaron en sus respuestas el concepto de equilibrio térmico, no activaron el elemento ***principio cero***, y ninguno de los dos reconoció la ***conservación de la energía*** en los procesos termodinámicos. Las respuestas de Carlos y Débora a la actividad *Fp04* ejemplifican las ideas alejadas de la ciencia escolar de estos dos estudiantes. Las manifestaciones escritas de Carlos reflejan que copió de manera irreflexiva las ideas que expresaron sus compañeros.

[Carlos, Fp04(2)]: Que non a merque, xa que para que funcionase a enerxía tería que ser como mínimo igual que o traballo

[Débora, Fp04(2)]: Aconsellaríalle que a comprase porque o consumir menos enerxía do que traballa o amigo sae favorecido, en resumo, traballa máis e consome menos.

La única diferencia entre los esquemas ***ER4*** de ambos alumnos está en que, por su mejor comprensión de la noción de trabajo, Carlos llegó a negar la existencia del móvil perpetuo de primera especie, mientras que Débora no.

Esquema *ER5*: *Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento de ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la fase previa.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 19* recoge las variables, junto con los subesquemas y sus relaciones, que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento ***ER5*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*. En la *Tabla 19* se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones del esquema ***aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos*** están representadas por el símbolo ***M***.

Tabla 19: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	19	*M01*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	0	*M02*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	11	*M03*
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	0	*M04*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M05*
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M06*
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	0	*M07*
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M08*
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	0	*M09*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	0	*M10*
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	0	*M11*
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	0	*M12*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M13*
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M14*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	0	*M15*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M16*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M17*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M18*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	0	*M19*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	0	*M20*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	0	*M21*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	0	*M22*
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M23*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	14	*M24*
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	11	*M25*
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	1	*M26*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	11	*M27*
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	1	*M28*
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	21	*M29*

El esquema referencial de razonamiento *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos* se compone de 29 relaciones, y los datos de la *Tabla 19* muestran que los estudiantes activaron 8 de ellas. La relación de mayor frecuencia se refiere a la cantidad de energía que necesitan las reacciones químicas para

comenzar; también tienen elevada frecuencia las relaciones que definen las interacciones químicas entre las partículas, y los procesos de ruptura y formación de enlaces como eventos de cambio en las reacciones químicas. Llegaron a construir un sencillo modelo microscópico para cacterizar las transferencias de energía que tienen lugar durante los procesos químicos, puesto que vincularon la energía interna del sistema (macroscópica) con la de las partículas (microscópica).

Además, asociaron las interacciones químicas con los intercambios de energía entre el sistema y el entorno, activando las relaciones ***A07*** y ***A09*** de ***ER3*** (*Tabla 13*, pág. 747).

Apenas analizaron la estabilidad relativa de los distintos estados de los sistemas objeto de estudio, porque sus conocimientos iniciales sobre los modelos de enlace y estructura de la materia eran muy fragmentarios. Sí llegaron a expresar que la variación de entalpía del sistema es un estimador del cambio de estabilidad química del mismo, y establecieron nexos entre las rupturas y formaciones de enlaces químicos, y la variación de entalpía y de energía interna del sistema, con lo que se obtuvo una cierta integración de los aspectos macroscópicos y microscópicos. Desde este punto de vista, las relaciones más importantes del esquema ***ER5*** pueden considerarse activadas con cierto éxito, aunque éste sea más bien irregular.

De las 20 relaciones del esquema referencial que no se utilizaron, se esperaba la no activación de las 9 que tratan los conceptos de desorden termodinámico y los vinculan con la energía de las partículas, el establecimiento de niveles energéticos en el sistema y la definición de los microestados de energía permitidos, así como la probabilidad que se les asigna desde la mecano-cuántica. Las 11 relaciones no activadas que se esperaba elaborar son las que hacen referencia a las distribuciones espacial y energética de las partículas del sistema, a las colisiones entre partículas y a la estabilidad que proporciona la fuerza de los enlaces químicos. Esta última completaría red de relaciones que aporta más profundidad interpretativa a los intercambios energéticos implicados en los procesos químicos; las demás pueden considerarse secundarias en el desarrollo de la fase previa, porque no ayudan significativamente a cumplir los objetivos de aprendizaje que se han seleccionado en el diseño y planificación de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Los esquemas iniciales de ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*** son suficientes como para abordar el estudio de la Termodinámica Química partiendo de la Termoquímica, aunque resultan bastante pobres para el nivel educativo de 2º de Bachillerato. Es cierto que el tema de estudio de la primera unidad didáctica pertenece a la Termodinámica Clásica, disciplina puramente macroscópica, por lo que es de esperar que el alumnado tienda a utilizar las relaciones de este dominio para construir sus descripciones e interpretaciones; pero desde las primeras actividades, los estudiantes sintieron la necesidad de recurrir a algunos conceptos microscópicos para explicar sus observaciones, aunque

no se les pidió explícitamente que lo hicieran. Sus respuestas revelan escasez de conocimientos sobre los modelos de partículas, enlace y reacción química.

De las 29 relaciones del esquema referencial ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos***, 18 eran ya conocidas, por los cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación f y sus correspondientes promedios de activación para estas relaciones conocidas y las 11 relaciones nuevas, se obtienen unos promedios bastante bajos, aunque éste es un resultado esperado, si se tiene en cuenta que casi todas las relaciones que se pretenden construir se vinculan con el concepto de desorden energético, fuera del ámbito de la Termoquímica:

$f_{(no\ nuevas)}$ **= 57**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 3** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 6**; y $f_{(nuevas)}$ **= 32**, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 3**, y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 7**. Los datos estadísticos indican que los alumnos tendieron a refugiarse en la utilización de las relaciones conocidas para construir sus descripciones e interpretaciones.

Las ideas microscópicas nuevas con mayor aceptación general son las que conducen a la justificación de los balances energéticos entre el sistema y el entorno en términos de ruptura y formación de enlaces químicos. Las demás, que permiten analizar en profundidad la distribución energética de las partículas del sistema, no se activaron durante la fase previa.

Tabla 20: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5)*** *en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	6	6	1	(0,1)
Fp02	*11*	*11*	*1*	*(1,1)*
Fp03	18	6	6	(0,6)
Fp04	14	11	5	(0,5)
Fp05	0	0	0	(0,0)
Fp06	*0*	*0*	*0*	*(0,0)*
Fp07	0	0	0	(0,0)
Fp08	0	0	0	(0,0)
Fp09	0	0	0	(0,0)
Fp10	*0*	*0*	*0*	*(0,0)*
Fp11	*0*	*0*	*0*	*(0,0)*
Fp12	0	0	0	(0,0)
Fp13	0	0	0	(0,0)
Fp14	40	8	6	(0,6)
Fp15	0	0	0	(0,0)

La *Tabla 20* recoge información sobre la activación de las relaciones de *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*, para cada una de las 15 actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*, con la información organizadas en las columnas que se explican en la *Tabla 8* (pág. 720).

Recuérdese que se presentaron 11 alumnos a las actividades *Fp01* – *Fp07*, y 10 a las demás, con las excepciones de *Fp10* y *Fp11* (6 asistentes) y *Fp15* (5 asistentes). La muestra se considera compuesta de 11 individuos hasta *Fp08*, cuando la ausencia casi definitiva de Débora redujo el número de individuos a 10.

Solamente cinco de las actividades de *Termoquímica* condujeron a la activación de ***ER5***, y las frecuencias son muy bajas, salvo para *Fp14*, en la que se pretendían desarrollar los aspectos microscópicos de los procesos químicos. La única actividad de indagación en la que se utilizó una relación de ***ER5*** es *Fp02*, con dos objetivos: en primer lugar, que los alumnos tuvieran la ocasión de recordar que la estructura de los sistemas materiales es corpuscular, y, en segundo lugar, comprobar hasta qué punto una evocación breve del dominio micrsoscópico de la materia servía para que los estudiantes activaran sus esquemas iniciales sobre los modelos de partículas, enlace y reacción química. En las actividades siguientes se comenzaría a construir la perspectiva macroscópica de la Termodinámica Clásica, y la introducción de los modelos microscópicos sobre los aspectos energéticos de los procesos no se realizaría hasta *Fp14*. En caso de que los alumnos apelasen en otras actividades a los conceptos del dominio microscópico, entonces estos conocimientos se vincularían al marco de la Termodinámica Clásica para construir un *corpus* teórico más interpretativo de los procesos que suceden en los sistemas materiales.

Los indicadores *f* y *R* de las actividades de aplicación *Fp03* y *Fp04* permiten concluir que la realización de *Fp02* tuvo un éxito aceptable en promover la explicitación de relaciones microscópicas ya presentes en los esquemas iniciales de los alumnos: en *Fp03* y *Fp04*, el número *R* de relaciones activadas creció, y el número *A* de alumnos que utilizaron relaciones de ***ER5*** evolucionó de la mitad de la muestra en *Fp03*, al total, en *Fp04*; sin embargo, al mismo tiempo la frecuencia *f* decayó ligeramente, porque los alumnos tendieron a reflejar en sus manifestaciones escritas solamente las ideas en las que estaba de acuerdo la mayoría de la muestra; como el proceso termodinámico que se plantea *Fp04* es más difícil de analizar que el de *Fp03*, los estudiantes se conformaron con razonamientos basados en aquellas relaciones de las que se sintieran más seguros, sin poner en juego constructos más complejos. En ***ER5***, a diferencia de lo que se observa en los demás esquemas de razonamiento, todas las actividades presentan un valor *mín* = 0 de las duplas *(mín,máx)*, lo que indica que siempre hubo al menos un alumno que no activó el esquema.

La actividad de mayor éxito en la activación de relaciones de ***ER5*** fue, como se esperaba, *Fp14*, dedicada a la introducción de relaciones microscópicas para justificar las diferencias de "poder calorífico" de cuatro hidrocarburos. Con menor frecuencia le siguen *Fp03* y *Fp04*, que proponen dos reacciones químicas cuya interpretación microscópica fue introducida por voluntad expresa de los propios estudiantes. Entre *Fp05* y *Fp13* no se produjo la activación de ninguna relación del esquema ***ER5***.

Los valores de las duplas *(mín,máx)* señalan una dispersión de los datos que parece no atenuarse a lo largo de la secuencia, aunque la ausencia de relaciones microscópicas en 9 actividades consecutivas no permite extraer conclusiones.

Para analizar la profundidad interpretativa que alcanzaron los alumnos en la construcción de modelos microscópicos de representación del conocimiento, hay que rescatar todas las relaciones microscópicas activadas durante la fase previa, también las contenidas en ***ER1***, ***ER2***, ***ER3*** y ***ER4***. La *Tabla 21* ofrece un resumen de los principales datos de activación de las relaciones microscópicas, incluyendo en la última columna los correspondientes al conjunto del macroesquema de razonamiento ***ERT*** (***Termoquímica y Termodinámica Química***).

*Tabla 21: resumen de los principales datos de activación de las relaciones microscópicas de los esquemas de razonamiento **ER1**, **ER2**, **ER3**, **ER4** y **ER5**, junto con el macroesquema **ERT**, en el desarrollo de la unidad didáctica Termoquímica*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*ER1*	*ER2*	*ER3*	*ER4*	*ER5*	*ERT*
$\mathbf{f_{(micro)}}$	757	118	45	0	89	1009
$\mathbf{\bar{x}_{(micro)}}$	45	24	11	0	3	17
$\mathbf{\sigma_{(micro)}}$	39	31	2	0	6	29

De las interpretaciones realizadas en los apartados anteriores y de los datos contenidos en la *Tabla 21*, se extraen las siguientes conclusiones sobre la activación de relaciones microscópicas durante la fase previa:

Al comparar las frecuencias de activación *f* correspondientes a los distintos ***ER***s, la de ***ER1*** sobresale significativamente sobre los demás, aunque no es el esquema con mayor número de relaciones microscópicas. La *f* asociada a ***ER4*** es nula, y las de ***ER1***, ***ER2*** y ***ER3*** son muy superiores a ***ER5***; el porcentaje de las relaciones activadas con respecto al total de relaciones microscópicas muestra que los alumnos llegaron a realizar una interpretación dinámica de las características microscópicas del proceso, pero basándose en los modelos de partículas y enlace, y no tanto en un modelo sobre la dinámica microscópica de la reacción química. Ya se ha comentado que los elevados valores de desviación típica que se observan en ***ER1*** y, sobre todo, en ***ER2*** y ***ER4*** (donde el valor de la desviación típica supera la media aritmética) no es necesariamente un indicador de una baja activación de las relaciones microscópicas: muchas de las relaciones de ***ERT*** corresponden al ámbito de la Termodinámica Química, así que se esperaba que los alumnos no las hubieran incorporado todavía a sus esquemas de razonamiento. De hecho, a medida que ampliaban sus conocimientos sobre las transferencias energéticas para reconstruir los aspectos dinámicos de los procesos que analizaban, aumentó la frecuencia de activación de algunas relaciones microscópicas de los esquemas de mayor desviación típica (***ER1***, ***ER3*** y ***ER4***); una consecuencia directa de esta tendencia es un crecimiento de la desviación típica de los datos.

Las ocho relaciones de ***ER5*** que se activaron sugieren que los alumnos desarrollaron un modelo energético microscópico embrionario, basado en la existencia de enlaces químicos entre unas ***partículas*** que tienen *energía*. Las diferentes ***interacciones entre partículas*** tienen distinta *fuerza de enlace*, y la ***ruptura de las interacciones*** requiere un aporte de energía. Durante las reacciones químicas se forman nuevos enlaces, lo que a su vez requiere energía. Sin embargo, las relaciones que se refieren a la ***distribución energética*** entre las partículas, así como a su movimiento y a las ***colisiones*** entre ellas, no se activaron. La única idea sobre la estructura microscópica de la materia que parece tener un significado para estos alumnos, es que en los distintos estados de agregación las partículas se distribuyen por el espacio de maneras diferentes; pero se han detectado ideas alternativas a este respecto, como se detalla en el apartado siguiente, en el que se discuten los resultados de activación de ***ER5*** sobre la base de los esquemas idiosincrásicos.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de razonamiento de los alumnos, que aparecen recogidos en la *Tabla 22*, siguiendo la misma clave de símbolos que la de la *Tabla 9* (pág. 723). Los esquemas ***ER5*** de los alumnos se han categorizado en cuatro niveles *p* de ordenación, de p_1 a p_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar), y en dos subniveles para los niveles p_2 y p_3.

Tabla 22: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER5, Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos****, de los alumnos*

NIVELES	p_4		p_3					p_2		p_1	
			p_{3b}			p_{3a}		p_{2b}	p_{2a}		
ALUMNOS	**Darío**	**Benito**	**Carlos**	**Adela**	**Clara**	**Ana**	**Alfonso**	**Mª P**	**Brais**	**Berta**	**Débora**
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓	✓
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMOD.	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
T ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DESORDEN TERMOD. es nulo en el CERO ABSOL.	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·

DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	·	✖	·	·	·	✖	✖	·	·	·	·
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✖	·	·
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	✓	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	·	✓	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

A continuación se describen los esquemas ***ER5*** prototípicos de cada nivel de ordenación, y se comentan las características que explican su categorización en los niveles $\boldsymbol{ER5_{Fp}} = [p_1,...,p_4]$.

Nivel $ER5_{Fp} = p_4$: esquemas *ER5* de Darío y Benito

Estos dos alumnos no tuvieron grandes dificultades para activar las 7 relaciones de ***ER5*** mediante las que construyeron un modelo de reacción química basado en la ruptura y formación de interacciones. Hicieron explícito que las ***partículas*** de las que constan los sistemas materiales establecen ***interacciones*** químicas entre ellas, y que las interacciones se caracterizan por su *fuerza de enlace*. Manifestaron que los procesos químicos de reacción y disolución consisten en ***rupturas de interacciones químicas*** y ***formaciones de interacciones químicas***, aunque les costó establecer detalladamente los aspectos energéticos de estos procesos microscópicos: ambos reconocieron que la ***ruptura de enlaces químicos*** requiere facilitar al sistema la *energía de enlace*, y que para comenzar las reacciones químicas se necesita un aporte de energía inicial, pero las ideas sobre el cambio de ***estabilidad*** de los sistemas como consecuencia de la ***ruptura*** y ***formación de interacciones químicas*** no están completas en ninguno de los dos esquemas: Benito no expresó que la ruptura de interacciones está asociada a una pérdida de estabilidad, y Darío no aludió a la estabilidad que gana el sistema como consecuencia de la formación de nuevas interacciones más favorables. Dado que cada uno de los dos estudiantes puso en juego una de las dos ideas, es posible que también estuviera presente la otra en sus esquemas de razonamiento, pero hemos

decidido no darlas por activadas, a la vista de los resultados que arroja la literatura del área sobre la inconsistencia de las ideas de los alumnos acerca de los enlaces químicos.

El esquema ***ER5*** de Benito contiene además una idea alternativa: atribuía distribuciones espaciales alternativas a las partículas en función de los estados de agregación. Creía, por ejemplo, que el zinc "desaparece" cuando reacciona con el HCl porque sus partículas se diluyen, al pasar a la fase líquida. Ya hemos comentado que los conocimientos iniciales de los alumnos de la muestra con respecto al dominio microscópico de la materia eran muy fragmentarios y pobres para el nivel educativo de 2º de Bachillerato.

Nivel $ER5_{Fp} = p_3$: subniveles $ER5_{Fp} = p_{3b}$ y $ER5_{Fp} = p_{3a}$

Subnivel $ER5_{Fp} = p_{3b}$: esquemas ***ER5*** de Carlos, Adela y Clara

Los tres estudiantes de este subnivel tienen ***ER5*** idénticos, con las mismas seis relaciones activadas. Con respecto a los esquemas de sus compañeros, no hicieron referencia a los cambios que se producen en la estabilidad químicas de las sustancias como consecuencia de las rupturas y formaciones de enlaces mediante las cuales los reactivos dan lugar a los productos. Sin embargo, ninguno de los tres alumnos tuvo dificultades para construir las ideas de la ciencia escolar que componen sus esquemas ***ER5*** iniciales. Como ejemplo del modelo microscópico que construyeron, se transcriben las manifestaciones de Carlos como respuesta a la actividad *Fp14*:

[Carlos, Fp14(2)]: Débese aos diferentes elementos que compoñen cada substancia e o nº de moles

Tamén depende dos enlaces e da sía formación e ruptura:

Coa formación de enlaces(C–O / O–H) desprendese enerxía e coa ruptura de (C–H / C–C / O=O / C≡C) absorvese enerxía

Subnivel $ER5_{Fp} = p_{3a}$: esquemas ***ER5*** de Ana y Alfonso

Los esquemas de estos dos alumnos son idénticos, y revelan algunas dificultades para construir las ideas de la ciencia escolar.

Ana y Alfonso no activaron las relaciones que vinculan el cambio de estabilidad de los sistemas con los procesos microscópicos de ruptura y formación de interacciones químicas. Como Benito, no reconocieron adecuadamente las distintas distribuciones espaciales de las partículas en los tres estados de agregación de la materia. Por ejemplo, aunque consideraban que el benceno es un gas, sus manifestaciones escritas recogen la siguiente idea:

[Ana, Fp14(1)]: O benceno, porque é máis denso e máis líquido, (…)

Al comienzo de la fase previa, ambos mantenían bastante inseguridad en sus ideas sobre el dominio microscópico, sobre todo en lo que respecta a la naturaleza de los enlaces químicos.

[Ana, Fp03(1)]: Ó mezclar o Zn co ácido rómpense os enlaces de hidróxeno e obtense $ZnCl_2$. (…)

[Alfonso, Fp03(1)]: (…) Rompese os enlaces metálicos do Zn e o iónico de HCl

Se han comentado también las dificultades que surgieron en la actividad *Fp14* para identificar el tipo de enlace presente en los hidrocarburos etano, eteno, etino y benceno, cuando solamente faltaban dos días para que se examinaran de Química Orgánica.

Nivel $ER5_{Fp} = p_3$: subniveles $ER5_{Fp} = p_{3b}$ y $ER5_{Fp} = p_{3a}$

Este nivel está compuesto por dos subniveles, cada uno de ellos con un esquema idiosincrásico.

Subnivel $ER5_{Fp} = p_{2b}$: esquema ***ER5*** de Diana

Aunque esta alumna no presentó grandes dificultades para utilizar algunas relaciones de la ciencia escolar, no activó las que tienen que ver con el cambio de estabilidad asociado a las modificaciones de los enlaces químicos, y no estableció que para romper un enlace determinado hace falta una cierta cantidad de energía. Sí hizo explícita la idea de que los distintos enlaces tienen una fuerza diferente, y que para empezar una reacción se requiere una cantidad de energía inicial. Su modelo energético microscópico de reacción química al finalizar la primera secuencia didáctica es bastante incompleto, lo que no sorprende si tenemos en cuenta que solamente trabajó con relaciones del dominio microscópico en las actividades *Fp03* y *Fp14*, y que en ésta su respuesta es un calco resumido de la lista de enlaces que se rompen y forman en la reacción, en el orden y con la simbología que se escribieron en la pizarra. Es previsible que sus ideas iniciales sobre las reacciones químicas no se vieran significativamente modificadas a lo largo de la fase previa:

[Diana, Fp03(1)]: (…) Cambio de estado sólido do Zn a líquido transparente. (…)

Subnivel $ER5_{Fp} = p_{2a}$: esquema ***ER5*** de Brais

El ***ER5*** de Brais hace referencia a la fuerza de los enlaces químicos, y establece que las reacciones químicas involucran la ruptura de interacciones entre partículas para generar los productos; no activa la formación de nuevas interacciones en el sistema. Aunque llega a reconocer que los procesos químicos requieren una cantidad de energía inicial para suceder, esta afirmación puede ser simplemente la descripción de sus observaciones personales sobre muchas reacciones que se producen en la vida cotidiana, bastantes de las cuales necesitan la

aplicación de una gran cantidad de energía cuya aportación suele ir acompañada de una fenomenología visualmente impactante: fuego, luz intensa, grandes aumentos de temperatura asociados a procesos electromagnéticos… En la actividad *Fp14* no recogió ninguna manifestación escrita sobre los aspectos microscópicos de las reacciones de combustión, y sus primeras ideas sobre la energía de los procesos de ruptura y formación de enlace son alternativas:

[Brais, Fp03(1)]: (…) burbulleo e a rotura dos enlaces provoca o desprendemento de calor en forma de enerxía.

Nivel $ER5_{Fp} = p_1$: esquemas *ER5* de Berta y Débora

Los esquemas de Berta y Débora, idénticos, sólo contienen dos relaciones del esquema ***ER5***: admiten que las partículas constituyentes de la materia establecen interacciones, y reconocen que las reacciones químicas necesitan de un aporte inicial de energía para suceder. Como se ha comentado en los apartados correspondientes a los demás esquemas de razonamiento idiosincrásicos, los conocimientos de estas dos alumnas sobre el dominio microscópico estaban bastante alejados de la ciencia escolar al principio de la intervención, y parecen no haber cambiado sustancialmente a lo largo de la fase previa, puesto que en las actividades en las que se trabajó con los modelos de partículas y enlace, apenas realizaron aportaciones sobre estos aspectos. En sus manifestaciones escritas se observan ideas alternativas que ya aparecen en los niveles básicos de la enseñanza:

[Berta, Fp01(x)]: (…) a Tª diminue e a densidade tamén por dilatación das particulas.

[Débora, Fp01(1)]: (…) Cos cambios de temperatura as moléculas de auga desnaturalízanse e fórmanse as burbullas a causa da ebullición de osíxeno. (…)

[Débora, Fp03(1)]: (…) a granalla de zinc pasa de estado sólido a líquido o añadir o ácido clorhídrico. (…)

III.3.1.2. Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción *EA1, …, EA4*

Los cuatro apartados que vienen a continuación están dedicados a la descripción de los esquemas de acción ***EA1*** (***Esquema EA1: Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos***, pág. 782), ***EA2*** (*Esquema* ***EA2: Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, pág. 793), ***EA3*** (*Esquema* ***EA3: Representación gráfica de aspectos termodinámicos***, pág. 807) y ***EA4*** (*Esquema* ***EA4****: Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*, pág. 814) que activaron los alumnos a lo largo de la fase previa.

Esquema *EA1*: *Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Antes de pasar a describir los resultados obtenidos, ha de hacerse una aclaración: ***EA1*** representa la estructura de acción deseable sobre el papel que tienen el reconocimiento, el control y la exclusión de las magnitudes termodinámicas en la identificación y descripción de los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos. Tiene, por lo tanto, muchos puntos de conocimiento científico en común con ***ER2***, que representa la estructura de razonamiento descriptiva e interpretativa de los procesos físicos y químicos como procesos termodinámicos. Mediante ***ER2*** (razonamiento) se construyen los significados de los constructos necesarios para conceptualizar los procesos termodinámicos como evoluciones posibles de un sistema material cuyas características experimentan cambios debidos a las interacciones con el entorno, mientras que ***ER1*** (acción) ilustra la estructura de acción representativa de las destrezas y estrategias que se ponen en juego para realizar las descripciones de los procesos físicos y químicos.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 23* recoge las variables, subesquemas y relaciones de los esquemas de acción ***EA1*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas durante la fase previa. En la *Tabla 23* se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***EA1***, representadas por el símbolo ***I***.

Tabla 23: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	141	*I01*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	142	*I02*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	141	*I03*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	141	*I04*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	141	*I05*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	126	*I06*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	72	*I07*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	53	*I08*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	102	*I09*

RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	75	*I10*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	71	*I11*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	0	*I12*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	0	*I13*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	140	*I14*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	55	*I15*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	61	*I16*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	45	*I17*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	101	*I18*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	89	*I19*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*I20*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	0	*I21*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	123	*I22*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	85	*I23*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	82	*I24*
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	73	*I25*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	38	*I26*
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	38	*I27*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	93	*I28*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	93	*I29*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	0	*I30*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	130	*I31*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	66	*I32*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	66	*I33*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	63	*I34*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	51	*I35*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	76	*I36*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	16	*I37*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	52	*I38*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*I39*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	137	*I40*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	107	*I41*

El esquema referencial de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** se compone de 41 relaciones, y los datos de la *Tabla 23* muestran que los estudiantes activaron 35 durante la fase previa. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la identificación de los ***procesos termodinámicos*** que tienen lugar en los ***sistemas termodinámicos*** propuestos, así como al reconocimiento de que la ***identificación y la descripción de los aspectos termodinámicos*** se realiza mediante el reconocimiento, el control y la exclusión de las magnitudes termodinámicas, para las cuales realizan un ***establecimiento de significados***. Podemos afirmar que la caracterización del proceso mediante las

variaciones de las magnitudes termodinámicas principales fue aceptable, si se comparan las frecuencias de activación de las relaciones sobre el control y la exclusión de las mismas, con las correspondientes al control y exclusión de las variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas (temperatura, presión, volumen), con las que los alumnos ya llevaban trabajando varios cursos: la utilización de ΔU (relación ***I18***) y ΔH (***I19***) supera la de ΔT, Δp y ΔV (***I15***, ***I16***,***I17***), tanto si se toman por separado como si se cotejan sumadas por grupos. En cuanto a las dependencias entre magnitudes, no sorprende que las *relaciones directas* tengan mayor frecuencia de activación que las *relaciones inversas*, porque de éstas solamente se ha estudiado el vínculo entre *presión* y *volumen*.

Sí es llamativo que los alumnos prefirieran centrar en el concepto de *trabajo*, y no tanto en el de *calor*, sus interpretaciones relacionadas con los principios que rigen el comportamiento de los sistemas termodinámicos. Recordemos que en ***ER2*** se manifestaba en más ocasiones el reconocimiento del calor como un proceso de transferencia energética, relacionado con la variación de temperatura, mientras que el trabajo tenía una aceptación menor, y los estudiantes tendían a relacionarlo más con la variación de volumen del sistema, que con el cambio de presión; sin embargo, a la hora de reflexionar sobre los principios que se verifican en las transferencias de energía entre el sistema y el entorno, consideraron que es más importante hacer un seguimiento de los procesos de transferencia por trabajo, menos conocidos para ellos y, por tanto, más difíciles de monitorizar. Estas ideas constatan que las actividades de *Termoquímica* sirvieron para revalorizar, a los ojos de los estudiantes, el *trabajo* como una transferencia energética que ha de tenerse en cuenta cuando se analizan los cambios que tienen lugar en sistemas que se encuentran en condiciones de presión constante.

Las 6 relaciones del ***EA1*** referencial que no se activaron son las que se refieren al reconocimiento, control y exclusión de las variables entropía y energía de Gibbs, sobre las que se esperaba precisamente la no activación.

De las 41 relaciones del referencial ***EA1***, 24 eran ya conocidas de cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación f y los correspondientes promedios de activación para estas relaciones y las 17 nuevas, se obtienen los siguientes datos: $f_{(no\ nuevas)} = 2305$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 96$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 38$; y $f_{(nuevas)} = 780$, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = 46$ y $\sigma_{(nuevas)} = 40$.

Queda claro que, si bien los alumnos no rechazaron las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones, la identificación y descripción de los procesos termodinámicos se basó fundamentalmente en las ya conocidas. Pero estos datos no indican una baja efectividad de la propuesta de enseñanza en la construcción de ideas nuevas. El hecho de que el promedio de activación de las relaciones ya conocidas sea aproximadamente el doble del correspondiente a las

relaciones nuevas, se explica por el bajo nivel de sistematización de ideas que tenían inicialmente los estudiantes: identificaban mejor los sistemas objeto de estudio y los cambios que sucedían en ellos, basándose en las magnitudes que más conocían, y se sentían más seguros elaborando descripciones sobre estos conceptos. Una prueba de que la construcción de las ideas de la termoquímica fue aceptable dadas las circunstancias, es que las desviaciones típicas $\sigma_{(no\ nuevas)}$ y $\sigma_{(nuevas)}$ no difieren tanto entre sí, a pesar de que seis de las relaciones nuevas sobre la entropía y la energía de Gibbs tienen frecuencia de activación cero. Como hemos indicado ya, los adolescentes de la muestra se enfrentaron a dificultades para utilizar conceptos y modelos teóricos que debían conocer y manejar con soltura desde varios cursos atrás, y el aprendizaje de la Termoquímica, aun condicionado por estos aspectos, se realizó en una extensión que permitió desarrollar bastantes ideas científicas sobre los intercambios energéticos que tienen lugar en los procesos físicos y químicos.

En la *Tabla 24* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*. Los datos de la tabla se organizan en las columnas que se explican en el apartado sobre el *Esquema* ***ER1: Sistemas termodinámicos*** (pág. 716).

Tabla 24: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1)*** *en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	202	11	22	(14,22)
Fp02	*143*	*11*	*13*	*(13,13)*
Fp03	196	11	30	(12,24)
Fp04	196	11	25	(12,22)
Fp05	304	10	33	(0,33)
Fp06	*308*	*11*	*28*	*(28,28)*
Fp07	265	11	33	(17,27)
Fp08	225	10	23	(21,23)
Fp09	230	10	28	(2,27)
Fp10	*174*	*6*	*29*	*(29,29)*
Fp11	*162*	*6*	*27*	*(27,27)*
Fp12	217	10	33	(16,31)
Fp13	200	10	23	(18,23)
Fp14	188	10	22	(12,22)
Fp15	75	4	19	(0,19)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termoquímica*: 11 se presentaron a las actividades *Fp01* – *Fp07*, y 10 a las demás, con las excepciones de *Fp10* y *Fp11* (6 asistentes) y *Fp15* (5 asistentes). La muestra se componía de 11 individuos hasta la realización de *Fp08*, y desde entonces fueron 10, debido al absentismo de Débora. En 13 de las 15 actividades todos activaron relaciones de ***EA1***. Las excepciones son *Fp05*, en la que Diana dejó en blanco su guion de trabajo, y *Fp15*, en la que hizo lo propio Brais.

Se resaltan en bastardilla los datos correspondientes a las actividades de indagación/reestructuración *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11*, para las cuales se asigna como número de relaciones utilizadas por el alumnado, el de las que se trabajan en el texto, como se ha explicado (*Esquema* ***ER1**: **Sistemas termodinámicos***, pág. 716).

Al comparar los valores de *f*, *R* y *(mín,máx)* que se han adjudicado a las actividades de indagación/reestructuración *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11*, y los valores obtenidos en las actividades de exploración y de aplicación correspondientes, se observa que en las de aplicación mejora la activación de relaciones de ***EA1***, exceptuando el caso de *Fp06*, a cuyo desarrollo inicial faltaron tres alumnos, Alfonso, Diana y Débora; resultados consistentes con los que ya se han comentado en *Esquema* ***ER2: Procesos termodinámicos***, pág. 731). Por lo tanto, se puede suponer que todos los alumnos que realizaron una actividad de indagación activaron todas (o prácticamente todas) las relaciones de ***EA1*** que se trataban. En cuanto a las duplas *(mín,máx)*, las estimaciones para *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11* no son sustancialmente diferentes de los valores máximos de las actividades de aplicación siguientes, aunque en los mínimos sí hay diferencia hacia el final de la unidad didáctica. De estos datos se deduce que no todos los alumnos lograron una buena activación de las relaciones del esquema ***EA1*** en las actividades de indagación.

Según los indicadores *f* y *R*, las actividades que condujeron a una mayor utilización de ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** son *Fp05* (con diferencia), *Fp06* (indagación) y la tríada *Fp07*, *Fp08*, *Fp09*. La dispersión de los datos es casi nula en *Fp08*, y baja en *Fp13*, como sucedió con los esquemas de razonamiento. En ambas actividades, el valor de *R* coincide con el máximo de la dupla *(mín,máx)*, y esto también sucede para *Fp01*, *Fp05*, y *Fp14*, lo que indica que la tercera parte de las actividades de *Termoquímica* ayudaron a algunos alumnos a alcanzar una buena eficacia en la identificación y descripción de los aspectos relevantes de los procesos termodinámicos. La consolidación que se produjo en *Fp13* para las relaciones activadas en *Fp12* se observa más tímidamente en ***EA1*** que en ***ER2***, y de manera más clara en el caso de *Fp08* con respecto a *Fp07*, en la que sí se produce una disminución en la dispersión *(mín,máx)*. Obsérvese la similitud de interpretación con respecto a ***ER2***: no es casualidad, porque ambos esquemas tienen un perfil descriptivo, ***ER2*** en lo que respecta a los razonamientos sobre las características que permiten definir los procesos termodinámicos como la evolución de los sistemas materiales, y ***EA1*** en lo que tiene que ver con la ejecución de dichos razonamientos en acciones útiles para transferir las ideas de la ciencia escolar a la descripción de procesos físicos y químicos.

Nuevamente, la actividad que menos relaciones ayudó a activar fue, con diferencia sobre las demás, *Fp15*, a la que solamente asistieron 5 alumnos, de los cuales uno no activó ninguna relación (de ahí que $A = 4$). Otra vez, el valor *R* señala que el número total de relaciones activadas es poco inferior al de otras actividades, y

la dupla *(mín,máx)* confirma que se promovió una activación irregular de ***EA1***, debido a los problemas actitudinales ya comentados.

Las actividades de mayor dispersión en la activación son, además de la citada *Fp15* (y *Fp05*), *Fp09*, *Fp03* y *Fp12* (lo que no coincide con los datos del esquema ***ER2***). Comencemos describiendo lo sucedido en las dos últimas:

Se trata de actividades de aplicación que se realizaron inmediatamente después de una actividad de indagación, y es llamativo el hecho de que, a pesar de la gran dispersión de las duplas *(mín,máx)*, tienen una frecuencia de activación buena. La dispersión se debe a que en estas actividades, que precisamente tuvieron lugar después de una indagación/reestructuración de las ideas anteriormente trabajadas, los alumnos que menos detallaban sus descripciones no sentían la necesidad de plasmar por escrito sus ideas de manera tan detallada (de ahí la no activación en ***EA1***), aunque de los razonamientos realizados (sí hay activación en ***ER2***) se desprende que las dominaban; después de una o dos actividades más, cuando los conceptos y modelos repasados no eran ya tan inmediatos para ellos, entonces se veían obligados volvían a poner en juego sus destrezas y estrategias para recuperar las ideas descriptivas de la ciencia escolar. De ahí que en ***EA1*** y ***ER2*** no coincidan con exactitud las actividades de menor activación.

En cuanto a la elevadísima dispersión de *Fp09*, recordemos que en ***ER2*** se percibía una clara dicotomización de la muestra desde *Fp08*: algunos alumnos ampliaban sus razonamientos, mientras que otros pasaban a activar menos ideas de la ciencia escolar, a pesar de las similitudes entre ambas actividades y el hecho de que ambas se implementaron en la misma sesión. Esta tendencia también se observa en ***EA1***, cuya dispersión de resultados en *Fp09* confirma que la tendencia analizada en ***ER2*** se debe a obstáculos de tipo actitudinal: los conceptos y modelos se dominan (***ER2***) más de lo que se ponen en acción (***EA1***) no por problemas relacionados con la transferencia de las ideas aprendidas a nuevos contextos (de hecho, *Fp09* no plantea contextos nuevos, sino que retoma los de *Fp07* y *Fp08*), sino porque el desarrollo de destrezas y estrategias exige trabajo intelectual, que algunos de los alumnos no realizaron a pleno rendimiento por cansancio o indolencia.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA1***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen en la *Tabla 25*, con la clave de símbolos habitual (*Tabla 9*, pág. 723).

Los niveles *p* de ordenación de los ***EA1*** idiosincrásicos son solamente dos, p_1 y p_2 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para los niveles p_2 y tres para p_1 (ver *Tabla 25*).

Tabla 25: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción ***EA1, Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos****, de los alumnos*

NIVELES	p_2								p_1		
	p_{2b}						p_{2a}		p_{1c}	p_{1b}	p_{1a}
ALUMNOS	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Berta**	**Darío**	**Diana**	**Clara**	**Débora**	**Carlos**	**Adela**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMOD. requiere identificar los SISTEMAS TERMOD.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMOD. interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMOD. incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMOD. pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMOD. consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	✓
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

A continuación se describen los esquemas ***EA1*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{EA1}_{Fp} = [p_1, p_2]$.

Nivel $\boldsymbol{EA1}_{Fp} = p_2$: subniveles p_{2b} y p_{2a}

Este nivel comprende los dos subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{2b} y p_{2a}.

Subnivel $\boldsymbol{EA1}_{Fp} = p_{2b}$: esquemas de Ana, Alfonso, Brais, Benito, Berta y Darío

Las dos primeras características más destacables de los esquemas ***EA1*** de la fase previa son las siguientes: en primer lugar, todos los alumnos tienen esquemas muy similares entre sí, y esta homogeneidad en la activación de relaciones se refleja en el hecho de que solamente existan dos niveles de ordenación de los ***EA1***. Además, en el subnivel más alto del nivel más acorde con el referencial de la ciencia escolar, se encuentran los esquemas ***EA1*** de seis alumnos, que son los tres de $\boldsymbol{G_C}$ (Brais, Benito y Berta), dos pertenecientes a $\boldsymbol{G_A}$ (Ana y Alfonso), más Darío, de $\boldsymbol{G_D}$. Los seis activaron todos los elementos relevantes para la resolución de las cuestiones planteadas, y en sus esquemas solamente faltan los elementos específicos de la secuencia sobre Termodinámica Química (es decir, el reconocimiento, el control y la exclusión de la entropía y la energía de Gibbs, así como de sus variaciones). Ninguno de ellos manifestó a lo largo de la fase previa alguna dificultad digna de mención en lo que respecta a poner en juego sus destrezas para identificar y describir los sistemas y procesos que se les plantearon en las actividades. La comparación de los esquemas de acción ***ER1*** idiosincrásicos, bastante homogéneos, con los ***ER2***, cuya ordenación incluye cinco niveles *p*, permite inferir lo siguiente:

En general, los estudiantes de la muestra no tuvieron grandes dificultades para desarrollar las destrezas que permiten reconocer los sistemas objeto de estudio en Química y darse cuenta de que los procesos consisten en evoluciones posibles de los mismos, que se estudian mediante la identificación, cuantificación y control de los cambios sucedidos. Sin embargo, se observó una falta significativa de conocimiento conceptual sobre la estructura de los sistemas materiales y sobre las propiedades de los mismos que permiten definir su estado, detectar cambios en éste e indagar en las características distintivas de los procesos. Los alumnos que mejores conocimientos conceptuales desarrollaron a lo largo de la fase previa (niveles *p* altos de ***ER2***), son también los que más repetidamente demostraron sus destrezas en la identificación y descripción de los sistemas y procesos termodinámicos, y se observan diferencias personales que ayudan a perfilar los estilos de aprendizaje de cada individuo:

Alfonso, Brais, Benito y Darío realizaron un aprendizaje fructífero en cuanto a la identificación y descripción de los sistemas y procesos, tanto en lo conceptual como en lo procedimental. Al finalizar la secuencia didáctica *Termoquímica*, sus esquemas ***ER2*** y ***EA1*** son bastante completos, y superaron las dificultades conceptuales que demostraban al principio de la intervención. También hay un claro paralelismo en la construcción de relaciones de ***ER2*** y ***EA1*** de Berta y Clara, aunque éstas no alcanzaron un nivel tan alto de conocimientos, y en Adela y Débora, que tuvieron dificultades en lo conceptual y lo procedimental.

En la revisión sobre la literatura en Didáctica de las Ciencias (***Volumen A***) se puso de manifiesto que ambos tipos de conocimiento (conceptual y procedimental) se adquieren y aplican por procesos diferentes y hasta cierto punto independientes (Pozo, 1989, 1996), y que desarrollar el conocimiento no se trata de «llevar a la práctica una teoría» (Gil Pérez *et al.*, 1990). De hecho, se constata que los alumnos pueden tener dificultades cuando intentan convertir sus conocimientos científicos descriptivos y conceptuales en acciones eficaces, o al definir o describir acciones que son perfectamente capaces de ejecutar Pozo y Gómez Crespo (1998). La comparación de los esquemas ***ER2*** y ***EA1*** de Ana, Berta y Diana revelan este tipo de dificultades. Sus esquemas tienen un perfil con menos coincidencias o convergencia entre los tipos de conocimiento conceptual y procedimental:

Ana, por ejemplo, llegó a dominar las destrezas de la ciencia escolar que permiten describir adecuadamente los procesos termodinámicos, pero tuvo que enfrentarse a bastantes dificultades de tipo conceptual. Según los profesores, se trata de una alumna aplicada y trabajadora, que tiende a "chapar toda la teoría otra vez" cuando se presenta a un examen. Esto indicaría un aprendizaje fundamentalmente memorístico, más repetitivo que significativo. Su método de estudio se basa, como el de la mayoría de sus compañeros, en la asimilación apresurada de mucha información teórica y unos pocos procedimientos (sobre todo de tipo algorítimico)

uno o dos días antes de la prueba escrita; pero el suyo no es un caso de posposición del aprendizaje en el sentido en el que lo enuncia Elliot (1990) , porque Ana siempre mantuvo una gran constancia en la realización de las tareas que los profesores encargaban a los alumnos para casa, y todos los días (o casi todos) revisaba pacientemente sus apuntes "teóricos" para pasarlos a limpio en una libreta. El proceso de aprendizaje que realizó durante la fase previa le ayudó a superar las principales dificultades conceptuales que demostraba al principio de *Termoquímica*, aunque sus conocimientos básicos sobre Química no eran sustancialmente diferentes a los de sus compañeros, fruto del fomento continuo de la memoria a corto plazo mantenido durante muchos cursos escolares. A diferencia de la mayoría de sus compañeros, sin embargo, ella se esforzaba en utilizar la terminología científica y en rescatar de su memoria los contenidos conceptuales que se supone que debería conocer ya; Débora y Diana también lo hacían, pero en menor medida. Éste es un claro rasgo de mantenimiento de la "cultura escolar", en lo que (Jiménez, Bugallo y Duschl, 2000) denominan *to do the lesson*, en contraposición a *to do science*.

Berta también tuvo más problemas en lo conceptual (*Esquema* ***ER2: Procesos termodinámicos***, pág. 731) que en lo procedimental. Su nivel de conocimientos, inicialmente bastante inferior al de Ana, experimentó una cierta mejoría a lo largo de la fase previa, pero al final de las actividades de *Termoquímica* sus expectativas de aprobar la materia de Química habían empeorado. Su calificación del examen tradicional fue muy baja (*Descripción del examen tradicional realizado tras la implementación de la unidad didáctica Termoquímica*, pág. 710), no se encontraba cómoda trabajando en el mismo grupo que Brais, y la metodología ensayada le exigía una cantidad y calidad de esuferzo a la que no estaba habituada. Por si esto fuera poco, un vendaval provocó tales pérdidas económicas a su familia que, pasado un cierto tiempo durante el cual Berta fue perdiendo progresivamente el interés por aprobar la asignatura en la convocatoria de junio, al final se vio obligada a abandonar temporalmente las clases para ayudar a reconstruir la granja familiar. Sin embargo, construyó un buen esquema ***EA1***.

Subnivel $\boldsymbol{EA1_{Fp}} = p_{2a}$: esquemas de Diana y Clara

Los ***EA1*** de este subnivel tienen el mismo número de relaciones que los de p_{2b}, pero Diana y Clara tuvieron dificultades a la hora de utilizar la relación entre la variación de energía interna del sistema y los procesos de transferencia de energía calor y trabajo. Dado el arraigo de las ideas alternativas de estas alumnas sobre las transferencias energéticas y la naturaleza de los procesos físicos y químicos, parece que los problemas para activar las relaciones ***I18*** e ***I29*** tuvieron su origen en obstáculos de tipo conceptual; a lo largo de la secuencia, los llegaron a superar.

Nivel $\boldsymbol{EA1_{Fp}} = p_1$: subniveles $\boldsymbol{EA1_{Fp}} = p_{1c}$, $\boldsymbol{EA1_{Fp}} = p_{1b}$ y $\boldsymbol{EA1_{Fp}} = p_{1a}$

Cada uno de los subniveles se corresponde con un esquema diferente:

Subnivel $\boldsymbol{EA1}_{Fp} = p_{1c}$: Débora

Con respecto a los esquemas de sus compañeros, la única relación que no activó Débora fue el vínculo entre el primer principio de la Termodinámica y las transferencias de energía por calor. En todo caso, y más teniendo en cuenta que asistió solamente a la mitad de las actividades de Termoquímica, su ***EA1*** es muy completo, a diferencia del ***ER2*** que construyó. En resumen, las destrezas que puso en juego fueron útiles en la descripción de los sistemas y procesos termodinámicos, aun con las limitaciones que le imponían sus ideas alternativas sobre los modelos de la Química y los esquemas macroscópicos incompletos que desarrolló. La aplicación de las magnitudes que ya conocía (temperatura, presión, volumen…) le ayudó a elaborar descripciones científicas básicas de procesos termodinámicos comunes que suceden en sistemas químicamente sencillos.

Subnivel $\boldsymbol{EA1}_{Fp} = p_{1c}$: Carlos

Ya se ha comentado que, al principio de la fase previa, los conocimientos de Carlos eran escasos y fragmentarios. Sus ideas iniciales sobre la naturaleza de las sustancias químicas debían de ser muy limitadas, aunque apenas las exteriorizaba, y los investigadores tuvieron problemas para realizar asignaciones ausentes en sus esquemas. De hecho, tuvo dificultades para identificar los sistemas termodinámicos cuando no se le facilitaban directa o indirectamente en el enunciado de la tarea; casi siempre leía de manera superficial los planteamientos de las actividades, y de ahí que elaborara respuestas como la siguiente:

[Carlos, Fp07(1)]: (…) - A masa dos compoñentes (Na, OH) (…)

En cuanto al control de las magnitudes termodinámicas, también manifestó dificultades para diferenciar la entalpía de la variación de entalpía, y poca iniciativa para clarificar sus dudas. A medida que avanzaba la intervención, la acumulación de nuevas ideas que aprender sin haber consolidado los prerrequisitos conceptuales lo hizo trabajar a remolque de su compañera Clara, quien se cansó de responder las preguntas de Carlos sin que éste la ayudase a cambio. A medida que se resolvieron más actividades sobre la variación de entalpía, Carlos solucionó sus dificultades con el control de la variación de entalpía. Pero, al igual que Débora, no activó la relación sobre el papel que juega el calor en el primer principio de la Termodinámica.

Subnivel $\boldsymbol{EA1}_{Fp} = p_{1c}$: Adela

Aunque Adela sí relacionó adecuadamente el calor con el primer principio de la Termodinámica, demostró bastantes problemas para determinar el valor de la variación de temperatura de un proceso y entender su significado. También tardó en integrar la variación de entalpía en las leyes de la Termodinámica, aunque llegó a hacerlo. Se trata de una alumna trabajadora, cuidadosa con la expresión y la presentación de sus ideas, pero con grandes dificultades para llegar dominar nuevos

conceptos y procedimentos, debido a una enfermedad metabólica que enlentece su aprendizaje. Sin embargo, el gran esfuerzo personal que realizó durante la fase previa le permitió activar esquemas de razonamiento comparables a los de sus compañeros. Es cierto que su ***EA1*** es el menos completo de la muestra, pero la diferencia entre los distintos ***EA1*** es pequeña, y sus demás esquemas de acción son comparables a los de los demás alumnos.

Esquema *EA2*: *Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 26* recoge los elementos y relaciones de los esquemas de acción ***EA2*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas durante la fase previa de la investigación. En la *Tabla 26* se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***EA2***, representadas por el símbolo ***R***.

Tabla 26: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	130	*R01*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	130	*R02*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	119	*R03*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	121	*R04*
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	120	*R05*
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	140	*R06*
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	140	*R07*
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	80	*R08*
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	67	*R09*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	63	*R10*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	30	*R11*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	30	*R12*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	0	*R13*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	39	*R14*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	39	*R15*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	0	*R16*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	0	*R17*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	62	*R18*
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	62	*R19*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMOD. son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	53	*R20*

UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	30	*R21*
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	46	*R22*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	16	*R23*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	62	*R24*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	0	*R25*
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	19	*R26*
CALOR se mide en JULIO/MOL	38	*R27*
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	10	*R28*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	10	*R29*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	56	*R30*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	0	*R31*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	0	*R32*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	8	*R33*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	6	*R34*
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	63	*R35*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	0	*R36*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	88	*R37*
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	134	*R38*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	134	*R39*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	110	*R40*

El esquema referencial de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** se compone de 40 relaciones, y los datos de la *Tabla 26* muestran que los estudiantes activaron 33. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la elaboración de ***representaciones algebraicas*** que den cuenta de la ***identificación y descripción de aspectos termodinámicos*** y de la ***interpretación de aspectos termodinámicos***, y de la necesidad de atenerse a ***convenios*** para alcanzar una ***consistencia en la simbología*** utilizada, sobre todo en lo que se refiere al ***léxico científico***. Los alumnos manifestaron en repetidas ocasiones la conciencia de que éste se caracteriza por la *eliminación de la polisemia cotidiana* y una gran *precisión en el lenguaje*, aunque, como se explicará en breve, tuvieron dificultades para hacer madurar estas ideas. También hubo obstáculos para alcanzar una cierta ***consistencia en la simbología*** con la que estandarizar las ***representaciones algebraicas***.

De las 7 relaciones del ***EA2*** referencial que no se activaron, 6 pertenecen al ámbito de la Termodinámica Química, y tienen que ver con las magnitudes entropía y energía de Gibbs, y con el desorden termodinámico de las partículas del sistema; en consecuencia, se preveía que los alumnos no las utilizaran durante la fase previa. Sí se esperaba que activaran la relación ***I16***, mediante la que se establece la escala absoluta de la energía interna a partir de la energía de las partículas. Teniendo en cuenta el bajo nivel inicial de conocimiento sobre los modelos químicos que demostraron los alumnos, a lo largo de las actividades de *Termoquímica* no hubo muchas ocasiones aprovechables para introducir afirmaciones teóricas relacionadas con los aspectos energéticos microscópicos de los sistemas materiales. Se hizo referencia, aunque brevemente, a la construcción de la escala absoluta de temperatura (escala Kelvin), que en teoría era ya conocida para los estudiantes; pero los fundamentos de las escalas de temperatura y de energía interna quedarían

pendientes de desarrollo hasta la unidad didáctica sobre Termodinámica Química. El profesor colaborador de la investigación, Rodrigo, manifestó en varias ocasiones su contrariedad por no poder profundizar desde el principio en los aspectos energéticos microscópicos, pero las limitaciones de tiempo impuestas por la cercanía de las PAAU y la escasa integración de los conocimientos de los alumnos no dieron margen a desarrollar los modelos de partículas, enlace y reacción química mucho más allá de lo imprescindible para construir razonamientos justificativos básicos del balance que tienen los intercambios de energía entre un sistema y su entorno.

De las 40 relaciones del referencial ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, 27 eran ya conocidas por haberlas trabajado cursos pasados. Las frecuencias de activación f y los correspondientes promedios para estas relaciones y las 13 nuevas son: $f_{(no\ nuevas)}$ **= 2032**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 75** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 46**; frente a ellas, $f_{(nuevas)}$ **= 223**, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 17** y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 23**. Estos datos estadísticos arrojan alguna luz sobre las dificultades que experimentaron los estudiantes para construir las ideas nuevas del esquema referencial de ***EA2***, que dan sentido a las escalas de medida que se utilizan para dar valores a las magnitudes termodinámicas principales. La revisión del estado de la cuestión (***Volumen A***) puso de manifiesto que los alumnos suelen tener dificultades para trabajar con las cantidades de magnitud de manera científicamente aceptable; tienden a olvidarse de expresar los signos y las unidades de medida asociados a las cantidades, y se centran en manipular irreflexivamente valores numéricos carentes de sentido Greenbowe y Meltzer, 2003. Estos resultados de la investigación concuerdan con los aquí obtenidos: los adolescentes de la muestra, sobre todo en las primeras actividades, estaban muy poco habituados a procesar de manera consciente y reflexiva las cantidades de magnitud, incluso cuando se trataba de expresarse sobre variables con las que llevaban familiarizados muchos años, como la temperatura y la presión del sistema. Las siguientes manifestaciones son un ejemplo de dificultades en la expresión de las cantidades de magnitud y su conceptualización:

[Berta, Fp01(x)]: (…) provocado por haber unha presión de menos dun 1º.

[Adela, Fp07(1)]: $\Delta H = Q_p$

$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$

$Q = 104 \cdot 4'18 \cdot (4 + 273)$.

$\Delta H = -120417'4$ julios.

[Alfonso, Fp07(1)]: $Q = m \cdot C_e$

$Q = (4 + 273) \cdot 4'18$

Q = 4680 (4 °C de variación) (…)

La tendencia a omitir las unidades de magnitud y los signos de las cantidades se ha descrito en el apartado correspondiente al desarrollo de las actividades de la fase previa en el aula (*Aplicación y desarrollo de las actividades de la secuencia Termoquímica en el aula*, pág. 601). En las actividades *Fp05*, *Fp08* y *Fp13*, el profesor tuvo que esforzarse en hacer ver a los estudiantes la necesidad de entender qué tipo de valores se manejan para dar respuesta a una cuestión y qué tipo de resultado se puede esperar, teniendo en cuenta la naturaleza y las condiciones del proceso que se estudia. Los alumnos demostraron muy poca destreza en la estimación de cantidades, y se ponían nerviosos cuando se trataba de conceptualizar la información que subyace a un valor numérico, o de reducir a un número un concepto conocido, como se observa en el debate que tuvo lugar durante la realización de *Fp15*, cuando Rodrigo preguntó cuál es el valor energético del agua. En general, el significado del conjunto numérico $\mathbb{R}$ y de conceptos matemáticos básicos, como el de valor absoluto, estaban poco afianzados, y en actividades como *Fp13* se observó cómo Adela y Clara consideraban que las variaciones entalpía indicaban una menor liberación de energía cuanto más negativas eran.

A pesar de todo, la desviación típica de los datos correspondientes a las relaciones nuevas indica que estas ideas tuvieron una aceptación general no desdeñable para la gravedad de los obstáculos que hubo que superar. Menos éxito indica, quizá, el elevado valor de $\sigma_{(no\ nuevas)}$, que revela problemas en la aplicación de destrezas en cuyo despliegue se suponía que no debería haber dificultades. Sin embargo, la adquisición del léxico científico por parte de los alumnos fue lenta y no se completó como hubiera sido deseable.

En la *Tabla 27* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades de *Termoquímica*, con la organización de datos que se ha explicado en (*Esquema **ER1**: Sistemas termodinámicos*, pág. 716).

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termoquímica*: 11 se presentaron a las actividades *Fp01 – Fp07*, y 10 a las demás, con las excepciones de *Fp10* y *Fp11* (6 asistentes) y *Fp15* (5 asistentes). La muestra se componía de 11 individuos hasta la realización de *Fp08*, y desde entonces fueron 10, debido al absentismo de Débora. Los datos de ***A*** indican que, en 13 de las 15 actividades, todos activaron relaciones de ***EA2***. Las excepciones son *Fp05*, en la que Diana dejó en blanco su guion de trabajo, y *Fp15*, en la que hizo lo propio Brais.

De la comparación entre las estimaciones teóricas correspondientes a las actividades de indagación/reestructuración *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11*, y los valores experimentales de las actividades de exploración y de aplicación correspondientes, se infiere que los alumnos aplicaron las relaciones de ***EA2*** trabajadas mediante los

textos de las actividades de indagación; el único caso que hay que matizar es el de *Fp02*, que aporta información interesante sobre los conocimientos iniciales de los estudiantes en lo que respecta a la representación léxica, algebraica e icónica de los aspectos termodinámicos:

Tabla 27: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)*** *en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	101	11	15	(2,15)
Fp02	*110*	*11*	*10*	*(10,10)*
Fp03	70	11	12	(2,12)
Fp04	103	11	14	(3,14)
Fp05	255	10	29	(0,27)
Fp06	*132*	*11*	*12*	*(12,12)*
Fp07	139	11	16	(9,15)
Fp08	237	10	25	(23,25)
Fp09	225	10	25	(4,25)
Fp10	*120*	*6*	*20*	*(20,20)*
Fp11	*126*	*6*	*21*	*(21,21)*
Fp12	175	10	19	(11,19)
Fp13	223	10	23	(19,23)
Fp14	203	10	24	(9,24)
Fp15	36	4	13	(0,11)

En *Fp01*, el profesor solamente dio una directriz específica al alumnado sobre cómo se deseaba que cada uno expresara sus ideas: utilizando su propio vocabulario de tal manera que quedara perfectamente descrito lo que se pretendía decir, sin ambigüedades y detallando al máximo los significados y la relación entre las observaciones que habían realizado y las explicaciones que consideraban pertinentes; durante el debate en gran grupo, se introdujo la necesidad de utilizar un lenguaje específico que dé un sentido preciso e inequívoco a las ideas de la ciencia escolar: el lenguaje científico. Después de la realización de *Fp02* (que fue la primera actividad de indagación/reestructuración de la fase previa),los alumnos intentaron aplicar a la interpretación de un proceso químico las nuevas ideas sobre la representación de los aspectos termodinámicos, en *Fp03*. Obsérvese que la activación de las relaciones del esquema ***EA2*** en esta actividad de aplicación no alcanza el valor estimado para *Fp02*, lo que indica que la incorporación de la terminología científica no se produjo inmediatamente después de la reestructuración de ideas. Pero desde *Fp03* hasta *Fp05*, se aprecia una clara evolución en la utilización de las relaciones de ***EA2***, hasta el punto de que la actividad *Fp06* tiene adjudicada una activación menor de ***EA2*** de lo que los alumnos expresaron en *Fp05*. Después de las nuevas ingadaciones de *Fp10* y *Fp12*, las actividades de aplicación del final de la unidad didáctica sirvieron para que los estudiantes demostraran un mayor dominio del lenguaje científico y las representaciones algebraicas en Termoquímica.

En cuanto a los valores de las duplas *(mín,máx)*, una vez más se observa que los máximos obtenidos por estimación para *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11* no son sustancialmente diferentes de los correspondientes a las actividades de aplicación siguientes, mientras que en los valores mínimos sí hay una notable diferencia. Así pues, algunos de los alumnos lograron una buena activación de relaciones del esquema ***EA2*** en las actividades de indagación, mientras que otros debieron de activar bastantes menos relaciones.

De acuerdo con los valores de *f* y *R*, las actividades que mejor activación de relaciones lograron son, en este orden, *Fp05* (exploración), *Fp08* y *Fp09*, seguidas de las actividades de aplicación *Fp13* y *Fp14*. No se verifica una gran diferencia de *f* entre *Fp05* y las demás, lo que apunta hacia una interiorización del vocabulario científico y de las representaciones matemáticas de los aspectos termodinámicos.

La actividad que menos ayudó a activar relaciones de ***EA2*** fue *Fp15*, debido a la baja asistencia y a la falta de trabajo que ya se han comentado en apartados anteriores; también destaca a la baja *Fp03*, por las dificultades que demostraron los estudiantes en la expresión de ideas relacionadas con las reacciones químicas:

[Ana, Fp03(1)]: (…) Ó mezclar o Zn co ácido rómpense os enlaces de hidróxeno e obtense $ZnCl_2$ (…).

[Alfonso, Fp03(1)]: Ó botarlle o ácido o cinc empeza a a botar vapor gas cara arriba burbullas e o tubo se quenta ó botarlle o ácido, ademais o cinc disolveuse no ácido (…).

[Brais, Fp03(1)]: O Zn reacciona co HCl e esta reacción deprende hidróxeno gas e burbullea e desprende calor. (…).

[Benito, Fp03(1)]: O Zn (s) desaparece, e a reacción bota fume, supoño que reacciona co HCl, rompéronse os enlaces de H e isto libera a enerxía en forma de calor (…).

[Carlos, Fp03(1)]: O Zn diluiuse, o tubo de ensaio contén unha disolución quente e no momento da disolución saiu ~~fume, ou vapor~~ un gas. (…).

[Berta, Fp03(1)]: (…) Os dous productos disolvense e forman unha disolución homoxenea e a sua vez solta ao exterior unha especie de gas como se fose vapor de auga, mentres os dous compostos forman unha reacción, feito que observamos porque burbullean de forma semellante que cando fervemos auga. Tras este fenomeno arriba contado se tocamos o tub este está quente. (…).

[Adela, Fp03(1)]: Reacciona el Zn con el ácido, y se deshace el Zn hasta que se convierte todo en liquido transparente. Además aumenta la temperatura, notando el

tubo de ensayo más caliente, cuando echamos el Zn con el ácido el tubo de ensayo estaba frío (…).

[Diana, Fp03(1)]: Ó botar o HCl no tubo de ensaio onde xa meteramos a granalla de cinc, mestúranse e disólvense a granalla de cinc. Además cando botamos o HCl quéntase o tubo, burbullea. (…) Cambio de estado sólido do Zn a líquido transparente.

[Clara, Fp03(1)]: Cando o ácido clorhídrio entra en contacto co cinc, este parece diluirse no ácido clorhídrico xa que antes de que entrase en contacto estaba en estado sólido, a agora a simple vista non se diferencian un de outro.

~~e libérase calor~~ O tubo quentase (…).

[Darío, Fp03(1)]: (…)Oo mesturarse o Zn co HCl se produce una reacción se produce una reaccion que libera calor, as burbullas formanse ao disolverse o Zn e o H_2 e un dos productos da reacción

[Débora, Fp03(1)]: Primeiro botabamos o zinc dentro do tubo de ensaio, despois bótase o ácido clorhídrico e o zinc disólvese e prodúcese unha reacción porque o líquido comeza a burbullear, logo se tocas o tubo de ensaio está quente.

Varía a temperatura, a granalla de zinc pasa de estado sólido a líquido o añadir o ácido clorhídrico. Libérase H_2

La dispersión de los datos es baja, nuevamente, en *Fp08* y *Fp13*, y significativa en las demás actividades, debido a los bajos resultados de tres alumnos: Berta, Brais y, sobre todo, Carlos. Se trata de los mismos estudiantes que mantenían una actitud de indolencia hacia el aprendizaje (es el caso de Carlos) o de desprecio y "sabotaje" (palabras del profesor Rodrigo para describir el comportamiento de Berta y Brais).

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA2***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos. Se categorizaron en los niveles y subniveles de la *Tabla 28*, cuya clave de símbolos ya se ha declarado en la *Tabla 9* (pág. 723).

Los niveles *p* de ordenación de los ***EA2*** idiosincrásicos son cuatro, de p_1 a p_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para los niveles p_1, p_2 y p_4, y tres subdivisiones para p_3 (ver *Tabla 28*).

Tabla 28: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción ***EA2***, ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_4			p_3			p_2			p_1	
	p_{4b}	p_{4a}		p_{3b}	p_{3a}		p_{2c}	p_{2b}	p_{2a}	p_{1b}	p_{1a}
ALUMNOS	**Adela**	**Darío**	**Benito**	**Ana**	**Alfonso**	**Berta**	**Carlos**	**Clara**	**Diana**	**Brais**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMOD. requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓	✓	✓	✓	💣	💣	💣	✓	💣	💣	✓
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	✓	✓	✓	✓	💣	💣	💣	✓	💣	💣	✓
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
CALOR se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	✓	·	·	✓	✓	✓	·	·	·	·	·

REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	✓	·	·	✓	✓	✓	·	·	·	·	·
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	💣	💣	💣	✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖	💣
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	✓	💣	💣	💣	💣	💣	💣	✓	💣	✓	✓
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	💣	💣	💣	✖	✖	✖	💣	✖	💣	✖	✓

A continuación se describen los esquemas ***EA2*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{EA2}_{Fp} = [p_1, \ldots, p_4]$.

Nivel $\boldsymbol{EA2}_{Fp} = p_4$: subniveles p_{4b} y p_{4a}

Este nivel comprende los dos subniveles que, ordenados desde el más acorde con la ciencia escolar, se rotulan como p_{4b} y p_{4a}.

Subnivel $\boldsymbol{EA2}_{Fp} = p_{4b}$: esquema de Adela

El esquema de Adela es el más acorde con el referencial ***EA2***. Activó 33 de las 34 relaciones de la ciencia escolar que se pretendían construir durante la implementación de Termoquímica, y, aunque tuvo dificultades en la utilización del ***léxico científico*** (sobre todo en la *precisión del lenguaje*), y con la simbolización de la cantidad de sustancia involucrada en las reacciones químicas por medio de la estequiometría, hizo evolucionar sus ideas alternativas inciales hacia las de la ciencia escolar hasta tal punto que podemos considerar aquéllas superadas, al menos, de manera transitoria; en los ***Capítulos*** siguientes se revela hasta qué punto es significativo el aprendizaje de estas destrezas científicas.

Una puntualización: aunque Adela no realizó adecuadamente las conversiones de unidades entre el grado Celsius y el Kelvin, sí construyó una noción de *escala absoluta* para la temperatura en relación con la energía del sistema. Sus problemas para cambiar de unidades son obstáculos de aprendizaje relacionados con los aspectos puramente matemáticos del conocimiento científico, y en concreto con la dificultad en la cuantificación numérica; estos aspectos, por considerarse no relacionados de manera directa con la Termoquímica y la Termodinámica Química, no se han recogido en los esquemas de acción, como tampoco el significado de las operaciones aritméticas básicas, con las cuales también se presentaron dificultades a lo largo de la intervención. Adela confundía las magnitudes termodinámicas con las variaciones de magnitud, aunque a medida que realizaba las actividades fue interiorizando las ideas de la ciencia escolar.

En general, los conocimientos básicos de estos alumnos en lo que respecta a las Matemáticas estaban poco consolidados, y en más de una ocasión hubo de interrumpirse la construcción de las ideas termodinámicas para aclarar dudas más propias de la ESO que de Bachillerato, sobre la noción de número, las operaciones aritméticas, la representación en el plano cartesiano, el concepto de función … A lo

largo de *Termoquímica*, los alumnos se acostumbraron a declarar las cantidades de magnitud en las unidades de medida adecuadas y a sistematizar la expresión de las operaciones en líneas de cálculo diferentes, utilizando los operadores matemáticos. Esta evolución se observa, por ejemplo, en las manifestaciones de Ana:

[Ana, Fp03(x)]: (…) Transferencias de enerxía no sistema

→ q (–) porque se perde

→ w (–) debido á expansión do gas (…)

[Ana, Fp04(2)]: (…) motor ideal (W = E)

motor real (W < E) (…)

Sin embargo, el escaso dominio del lenguaje matemático dificultó la adopción razonada de la simbología internacional para indicar que los datos termoquímicos se se refieren a las condiciones normales (ΔH^0), que en principio no eran un objetivo explícito de esta unidad didáctica, pero habrían ayudado a los alumnos a expresar más información en la simbología matemática de las magnitudes termodinámicas.

El nivel inicial de expresión lingüística de los estudiantes era notablemente bajo. En las primeras actividades abundaron expresiones cotidianas que tienden a confundir los conceptos de sensación térmica, temperatura y calor (Michinel y D'Alessandro, 1994; Domínguez, 2000), especialmente en alumnos poco cuidadosos con la precisión de su vocabulario, como Alfonso o Carlos. También los conceptos de proceso físico y reacción química se desdibujaban. A lo largo de las quince actividades se detectan cambios significativos en la elección de los términos científicos, pero fundamentalmente en lo que a Termoquímica se refiere. El descuido en la expresión no se limitaba a la ortografía y la puntuación, y llegaba hasta el punto de mezclar expresiones en gallego y castellano en la misma oración, incluso en aquellos alumnos que se esmeraban en su producción escrita, como Adela:

[Adela, Fp05(1)]: (…) Es decir habría más energía en el proceso en el que el recipiente estuviera pechado (…)

La falta de hábito en la redacción oscurece la interpretación de los significados que se utilizan en las interpretaciones de los aspectos energéticos, aunque los alumnos demuestren conocer las ideas de la ciencia escolar:

[Alfonso, Fp14(2)]: Non só se debe á variación de auga senón tamen os tipos de enlaces que os unen, dobres, triples ou simples. Por exemplo no C_2H_2 e C_6H_6, no C_6H_6 deberia de dar o triple C_2H_2 pero da un pouco menos. (…)

En cuanto a las representaciones icónicas, en la fase previa no se elaboraron

dibujos o diagramas en los que se pusieran de manifiesto aspectos microscópicos del sistema; hasta este momento de la intervención, los alumnos solamente realizaron esbozos o pequeñas figuras esquemáticas para apoyar sus interpretaciones. Un ejemplo interesante encaja en el subnivel p_{4b}: en pleno proceso de apropiación de las ideas científicas sobre la naturaleza del trabajo como proceso de transferencia de energía, Adela utilizó pequeños dibujos mediante los que condensó en pocas palabras las ideas de la ciencia escolar:

[Adela, Fp04(2)]: (…) Eª ⇒ sistema ⇒ W (…)

[Adela, Fp05(1)]: (…) (…)

Subnivel $\boldsymbol{EA2}_{Fp}$ = p_{4a}: esquemas de Darío y Benito

Los esquemas de Benito y Darío se diferencian del de Adela en que estos alumnos no realizaron ninguna representación icónica, y su empeño por eliminar de su expresión escrita la polisemia del lenguaje cotidiano fue menor. Ambos llegan a un buen nivel de acercamiento a las expresiones de la ciencia escolar, aunque sus "puntos flacos" son diferentes:

Darío era bastante desordenado en cuanto al lenguaje matemático, y propenso a olvidarse de los signos de los valores numéricos, aunque sus escuetas respuestas escritas permiten inferir que reconocía los convenios científicos sobre los signos del calor y el trabajo. Además, se mostró más que capaz de ordenar por escrito sus ideas sin necesidad de utilizar fórmulas:

[Darío, Fp07(1)]: (…) Usariamos un calorimetro, para establecer la medida de una forma mas exacta. Como precaución debemos de medir a T_i moi ben, para que non exista ningun erro. Informacións: ΔT, masa total da disolución ($NaOH + H_2O$). Necesitamos a maiores coñece-lo calor específico do disolvente.

Benito, por su parte, tenía dificultades para expresar verbalmente lo que pensaba:

[Benito, Fp01(1)]: Que deixa de facer burbullas porque diminúe a súa temperatura (…)

[Benito, Fp04(2)]: Non pode ser, porque a non ser que o sistema teña enerxía interna, un motor non pode xerar máis traballo que a enerxía que se lle aplica

Sin embargo, su dominio del lenguaje matemático era mayor que el de la mayoría de sus compañeros:

[Benito, Fp04(2)]: $W = P \cdot \Delta V = \Delta n \cdot R \cdot T = (2-1) \cdot 0{,}082 \cdot 298 = 2480\ J = 2'48\ KJ$

–113 = Q + (–2,48) → Q = –111 KJ

Subnivel $\boldsymbol{EA2}_{Fp} = p_{3a}$: esquema de Ana

Los esquemas ***EA2*** de Ana y de su compañera de grupo Adela se parecen, aunque Ana tendía a utilizar el lenguaje científico siguiendo un juego de la cultura escolar: *adornar* su expresión utilizando términos técnicos de manera poco significativa. Además, probablemente para diferenciar sus manifestaciones escritas de las de su compañera, con la que colaboraba estrechamente en los debates de grupo, procuraba matizar la redacción final de sus guiones de trabajo de una manera casi literaria:

[Ana, Fp14(1)]: (…) O benceno, porque é máis denso e máis líquido, polo que é máis manexable, aínda que hai que ter en conta outros factores como o prezo, a masa, a ΔH…

[Adela, Fp14(1)]: Por lo tanto escojeriamos el benceno puesto que es el que tiene menor ΔH y por lo tanto libera más energía. Además es liquido (…)

Pero en sus manifestaciones escritas se aprecia que esta alumna adoptó el lenguaje de la ciencia escolar hasta un grado aceptable, y mejoró notablemente en su utilización del lenguaje matemático y en la seguridad con la que realizaba los cálculos. Por otra parte, activó el elemento *representaciones icónicas* en su ***EA2***: realizó el mismo dibujo que Adela en respuesta a la actividad *Fp05*, y durante el diseño de la experiencia calorimétrica explicó de manera pictórica el aumento de temperatura:

[Ana, Fp07(1)]: (…)

(…)

Subnivel $\boldsymbol{EA2}_{Fp} = p_{3a}$: esquemas de Alfonso y Berta

Los ***EA2*** de estos dos alumnos terminan por parecerse al de Ana hacia el final de la fase previa, aunque expresar en las primeras actividades ambos experimentaron ciertas dudas a la hora de expresarse mediante el lenguaje matemático: Alfonso tendía a olvidarse de signos y unidades, hasta que sus compañeras de grupo se lo recordaban, y Berta se sentía insegura por no saber de memoria las fórmulas y las copiaba sin razonar sus respuestas.

[Berta, Fp05(1)]: (…) ΔV = Q + W (…)

Sin embargo, la utilización de las unidades de magnitud adecuadas a los rangos de valores de trabajo y la expresión de los resultados con sus correspondientes cifras significativas demuestra que Berta dominaba ciertos aspectos del lenguaje matemático en mayor extensión que sus compañeros.

En cuanto al vocabulario utilizado, ya se ha comentado que Berta comenzó detallando bastante sus manifestaciones escritas, pero a medida que pasaba el

tiempo fue haciendo más breves sus respuestas. De ellas se infiere que incorporó las ideas de la ciencia escolar hasta un punto razonable, aunque no se observa directamente el abandono de los términos cotidianos:

[Berta, Fp12(x)]: Que aínda que calcules toda a enerxía do sistema o calorimetro deixa escapar outra que non podemos calcular porque se perde.

Por su parte, Alfonso es (junto con Carlos), el alumno cuyos guiones de trabajo contabilizan mayor número de expresiones ambiguas, tautologías, anacolutos, faltas de concordancia entre sujeto y predicado, y errores de expresión similares; de nada sirvió que los profesores censuraran su falta de interés por expresar de manera inteligible sus ideas. Sus respuestas se reducen al mínimo, y no utiliza representaciones icónicas para complementarlas, salvo en la actividad *Fp07*, en que realiza el mismo dibujo que Ana para expresar el aumento de temperatura del sistema durante la disolución del hidróxido de sodio:

[Alfonso, Fp07(1)]: (…) (…)

Nivel $EA2_{Fp}$ = p_2: subniveles p_{2c} (Carlos), p_{2b} (Clara), p_{2a} (Diana)

Ninguno de estos tres alumnos utilizó representaciones icónicas para apoyar sus respuestas, y la adopción del vocabulario científico presenta más dudas e imprecisiones. En general, la consistencia en la simbología matemática y la precisión en la expresión escrita son menores que en los alumnos de los niveles p_3 y p_4. Ya se ha comentado el caso de Carlos, que en algunos apartados de las actividades más cognitivamente demandantes se limitó a decir que la intervención del profesor le había ayudado mucho a cambiar sus ideas, sin mencionar qué de nuevas ideas se había convencido.

No resulta fácil trazar la evolución en el vocabulario científico de Clara y Diana hacia el final de la unidad didáctica, porque sus últimas manifestaciones escritasson bastante parcas. Como ejemplos, se ofrecen algunos extractos que contienen ideas de la ciencia escolar, pero resumidas a la mínima expresión; obsérvese la similitud entre las respuestas de ambas alumnas:

[Diana, Fp12(x)]: Que hai que ter en conta a corrección do calorimetro cando hallamos a variación de entalpía

[Clara, Fp12(x)]: Sí, que o calcular o valor de Q hai que tomar en conta a masa do calorímetro

[Diana, Fp14(2)]: Débese a formación de C=O O–H e rompense enlaces entre C–H, C–C, C=C, C≡C, C¨¨C, O=O

[Clara, Fp14(2)]: Na formación de enlaces dobles entre C=O e simples entre O–H, que desprenden enerxía

A enerxía que se absorve cando se rompen os enlaces simples entre C–H, C–C dobles entr C=C, O=O, e triples entre C≡C

Clara no llegó a utilizar las unidades de J/mol para expresar las cantidades de trabajo y de variación de energía interna.

Nivel $EA2_{Fp}$ = p_1: subniveles p_{1b} (Brais) y p_{1a} (Débora)

Brais es el único alumno de la muestra que no llegó a utilizar adecuadamente la estequiometría para representar la cantidad de materia de los sistemas químicos, aunque sus respuestas a este respecto son demasiado breves como para asegurar si no conocía la idea de que las reacciones químicas suceden molécula a molécula, mol a mol, en cantidades estequiométricas… o si simplemente se había cansado de ajustar ecuaciones químicas y se dedicó a resolver aquellos casos cuyos coeficientes eran más fáciles de calcular. En todo caso, desde el punto de vista analítico parece más prudente considerar que sostenía ideas alternativas a este respecto, teniendo en cuenta que en general se resistía a elaborar razonamientos (prefería recurrir al aprendizaje memorístico) y tendía a utilizar las expresiones del lenguaje científico de manera poco reflexiva:

[Brais, Fp01(x)]: Variou en que eu non atopaba explicación para que fervera a auga e que non me acordaba de que a auga ten o seu punto de ebullición a 100º e 1 atm.

[Brais, Fp03(1)]: Ao liberar gas provócase o burbulleo e a rotura dos enlaces provoca o desprendemento de calor en forma de enerxía.

[Brais, Fp05(1)]: (…) $\Delta V = Q + W$ (…)

En cuanto a la utilización de la simbología matemática, tendía a manipular de manera automática las fórmulas, y a olvidarse de los signos y las unidades de las cantidades de magnitud. Cuando un cálculo resultaba laborioso, optaba por esperar a que sus compañeros lo hicieran, para después copiar la respuesta, y, en algún caso, tampoco llegó a transcribir las manifestaciones escritas de sus compañeros. De hecho, solamente cubrió a última hora los apartados de *Fp08* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp08: determinación del calor de disolución del* $NaOH_{(s)}$, pág. 640), y no halló ninguna de las variaciones de entalpía asociadas a las reacciones de combustión de *Fp14*. Tampoco hizo representaciones icónicas.

Como era de esperar, dado que la construcción de destrezas suele ser más lenta que la de razonamientos, y que Débora faltó al desarrollo de la última mitad de Termoquímica, su esquema ***EA2*** es el menos completo de la muestra. No activó la escala de medida para la entalpía, ni expresó que la variación de temperatura se

mide en Kelvin (aunque es posible que lo supiera; en *Fp05* utilizó el Kelvin para expresar la temperatura). Tampoco realizó ninguna representación icónica que apoyara sus ideas. Aunque cita más palabras del léxico científico que varios de sus compañeros, las utiliza de manera poco significativa, como también se observa al inicio de la intervención en Ana y Diana (rasgo propio de la cultura escolar).

Esquema *EA3*: *Representación gráfica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 29* recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de acción ***EA3*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron durante la fase previa de la investigación. En la *Tabla 29* se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***G***.

Tabla 29: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	8	*G01*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	12	*G02*
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	12	*G03*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	13	*G04*
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	14	*G05*
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	14	*G06*
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	15	*G07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	34	*G08*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	16	*G09*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	31	*G10*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	15	*G11*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	15	*G12*
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	15	*G13*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	13	*G14*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	0	*G15*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	1	*G16*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	10	*G17*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	10	*G18*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	0	*G19*
EJES presentan DIVISIONES	9	*G20*
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	9	*G21*
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	14	*G22*
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	9	*G23*

EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	0	*G24*
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	14	*G25*
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	0	*G26*
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*G27*
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	0	*G28*
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	15	*G29*
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	15	*G30*
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	15	*G31*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	12	*G32*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	10	*G33*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	1	*G34*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	0	*G35*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	0	*G36*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	0	*G37*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	15	*G38*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	15	*G39*

El esquema referencial de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** se compone de 39 relaciones, y los datos de la *Tabla 29* muestran que los estudiantes activaron 30, aunque todas con frecuencias de utilización bajas, porque solamente en dos actividades se esperaba que construyeran algún tipo de representación gráfica. Las 9 relaciones del ***EA3*** referencial que no se activaron son las que se refieren a la realización de gráficas entrópicas, que no se trabajarían hasta la fase de intervención (***Capítulo V***).

De las 39 relaciones del referencial ***EA3***, 21 eran ya conocidas de cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación f y los correspondientes promedios para estas relaciones y las 18 nuevas, se obtiene: $f_{(no\ nuevas)} = \mathbf{227}$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = \mathbf{11}$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = \mathbf{5}$; y $f_{(nuevas)} = \mathbf{174}$, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = \mathbf{10}$ y $\sigma_{(nuevas)} = \mathbf{11}$. Si se tienen en cuenta las dificultades iniciales de estos alumnos para trabajar con magnitudes físicas y con la representación matemática de valores de magnitud, el hecho de que se obtengan promedios de activación comparables entre las relaciones en teoría ya conocidas y las nuevas, es hasta cierto punto un éxito: a pesar de los problemas de aprendizaje, se llegó a una efectividad aceptable en la elaboración de gráficas termodinámicas. Pero solamente por parte de algunos alumnos, como indica la elevada dispersión que se alcanza en $\sigma_{(nuevas)}$ con una frecuencia tan baja. Así pues, las actividades *Fp05* y *Fp13* ayudaron solamente a algunos alumnos a elaborar diagramas entálpicos, con los que se da cuenta del balance energético involucrado en los procesos termodinámicos.

A la hora de interpretar los resultados, hay que tener en cuenta que no es lo mismo interpretar que realizar una representación gráfica (García y Perales, 2007): la construcción de una gráfica a partir de los pares de datos involucra conocimientos más abstractos y destrezas más avanzadas, además de que requiere un grado de coordinación mayor para las acciones a realizar; entre otras, destacan las siguientes: los alumnos tienen que identificar las variables que serán objeto de representación, distinguiendo entre la variable independiente y la dependiente, y deben analizar los

datos de los que se dispone, seleccionar las escalas de valores adecuadas y distribuir los pares de valores en la representación de manera que se visualicen las dependencias que se pretende poner de manifiesto.

La lectura y la elaboración de representaciones gráficas forman parte de los contenidos de *Matemáticas* y *Fïsica y Química* de la ESO. En cursos pasados, los alumnos de esta muestra habían trabajado estos aspectos en ambas asignaturas, y el profesor, Rodrigo, consideraba que en principio no había motivos para pensar que se presentaran grandes dificultades a la hora de construir los diagramas entálpicos. De hecho, con la finalidad de ganar tiempo en el desarrollo de las actividades, pidió a los estudiantes que hicieran las gráficas de la actividad *Fp05* en casa, dando por supuesto que sabrían identificar las variables objeto de estudio, determinar qué pares de valores eran claves en la representación, y situarlos de acuerdo con sus correspondientes ejes. En el apartado del desarrollo de esta actividad en el aula (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp05: calor de reacción, a V = cte y a p = cte*, pág. 623), se describe cómo esta estrategia del profesor fracasó por completo.

En la *Tabla 30* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***procesos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*. Los datos de la tabla se organizan en las columnas que se explican en *Esquema **ER1**: Sistemas termodinámicos* (pág. 716).

*Tabla 30: activación de las relaciones del esquema de razonamiento **Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3)** en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	0	0	0	(0,0)
Fp02	0	*0*	0	(0,0)
Fp03	0	0	0	(0,0)
Fp04	0	0	0	(0,0)
Fp05	239	10	27	(0,27)
Fp06	0	*0*	0	(0,0)
Fp07	0	0	0	(0,0)
Fp08	0	0	0	(0,0)
Fp09	0	0	0	(0,0)
Fp10	*12*	*6*	*2*	(2,2)
Fp11	*18*	*6*	*3*	(3,3)
Fp12	20	10	2	(0,2)
Fp13	112	10	27	(0,26)
Fp14	0	0	0	(0,0)
Fp15	0	0	0	(0,0)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termoquímica*: 11 se presentaron a las actividades *Fp01 – Fp07*, y 10 a las demás, salvo a *Fp10* y *Fp11* (6 asistentes) y *Fp15* (5 asistentes). La muestra se componía de 11 individuos hasta *Fp08*, y desde entonces, 10, debido al absentismo de Débora. Solamente *Fp05* y *Fp13* piden la elaboración de un diagrama entálpico; pero el esquema de acción ***EA3*** incluye también tres relaciones sobre la representación de

datos termodinámicos mediante las ecuaciones termoquímicas, y estas ideas se trabajaron en *Fp10*, *Fp11* y *Fp12*. Así pues, en 5 de las 15 actividades, los alumnos activaron relaciones de ***EA3*** (salvo Diana en *Fp05*, porque dejó en blanco su guion).

Según la tabla de datos, las relaciones trabajadas en las actividades de indagación/reestructuración *Fp10* y *Fp11* se incorporaron como acciones efectivas en las actividades de aplicación *Fp12* y *Fp13*. Llama la atención, sin embargo, que entre *Fp05* y *Fp13* baja a la mitad la frecuencia de activación, a pesar de que el número máximo de relaciones activadas es comparable. La explicación está en la caída en el número de alumnos que llegan a realizar una representación gráfica de los procesos químicos propuestos: en *Fp05*, son todos salvo Diana, y en *Fp13* solamente Ana, Adela, Clara y Darío hacen un diagrama completo; Alfonso se limita a dibujar unos ejes y representar el estado inicial de una de las reacciones.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la *Tabla 31*, siguiendo la clave de símbolos que se utilizó para la *Tabla 9* (pág. 723).

Los niveles *p* de ordenación de los ***EA3*** idiosincrásicos son cuatro, de p_1 a p_4. El número de subdivisiones da una idea de la confusión que demostraron los alumnos en la fase previa (ver *Tabla 31*).

Tabla 31: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***EA3***, ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos***, *idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_4				p_3			p_2			p_1
	p_{4c}	p_{4b}		p_{4a}	p_{3b}		p_{3a}	p_{2c}	p_{2b}	p_{2a}	
ALUMNOS	**Clara**	**Benito**	**Carlos**	**Brais**	**Adela**	**Darío**	**Alfonso**	**Débora**	**Ana**	**Berta**	**Diana**
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✖	✓	✓	✓	💣	✖	✖	✖	✖	✖	·
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✖	✓	✓	✖	·
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✖	✓	✓	✖	·
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓	✖	✓	·
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	✓
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✖	✖	✓	✖	✓

REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓	✖	✓	·
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	✓	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✖	✓	·
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✖	✓	·
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
EJES presentan DIVISIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMOD.	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓	✖	✓	·
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✖	✓	·
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	✓	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·

A continuación se describen los esquemas ***EA3*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = [p_1, \ldots, p_4]$.

Nivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_4$: subniveles p_{4c}, p_{4b} y p_{4a}

Este nivel comprende los tres subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como p_{4c}, p_{4b} y p_{4a}.

Subnivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_{4c}$: esquema de Clara

El ***EA3*** de Clara es el más completo, porque esta alumna fue la única de la muestra que indicó inequívocamente en sus gráficas que la variable independiente de los diagramas entálpicos es el avance de la reacción (simbolizada de manera implícita mediante la representación del estado del sistema). El grado de separación horizontal de las líneas mediante las que simboliza los estados inicial y final, junto con la inclinación de la flecha con la que indica el sentido del intercambio energético, todo ello hace pensar que Clara concibe sus diagramas entálpicos como algo más que una *foto finish* del sistema: entre *reactivos* y *productos* (así los rotula)

sucede la reacción, que involucra procesos energéticos sobre los cuales no tenemos información. Estas ideas aparecen ya en su gráfica de la actividad *Fp05*.

Las únicas dudas que tuvo Clara a la hora de representar los intercambios energéticos se debieron a la confusión conceptual entre la entalpía y la variación de entalpía: ¿cuál de las dos se dibuja en el diagrama? En *Fp05* no lo tenía claro, y optó por representar como variable dependiente el calor, equivalente a la variación de entalpía. Despejadas sus duas, en *Fp13* identificó las magnitudes independiente y dependiente… y sus problemas con el significado de los números negativos y el concepto de valor absoluto le hicieron representar el estado final en un nivel energético *superior* al estado inicial.

Subnivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_{4b}$: esquemas de Benito e Carlos

Estos alumnos no tuvieron dudas a la hora de identificar la variable independiente (aunque Carlos copió de sus compañeros las principales ideas sobre el diagrama), aunque en sus representaciones, que se limitan a la actividad *Fp05*, no demuestran manejar la idea del avance del proceso. En sus gráficas, Benito llega a rotular bajo el eje de la variable independiente "W" y "tempo", aunque las indicaciones de "1" y "2" que añade a los pares de valores indican que pretendía representar como variable independiente el estado del sistema.

Subnivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_{4a}$: esquema de Brais

Este alumno solamente realizó las representaciones gráficas de la actividad *Fp05*, y las copió de Darío. Como ya se ha indicado, no llegó a escribir adecuadamente las ecuaciones termoquímicas para dar cuenta de los aspectos energéticos asociados a las reacciones químicas.

Nivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_3$: subniveles p_{3b} y p_{3a}

Subnivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_{3b}$: esquemas de Adela y Darío

Aunque las representaciones de ambos alumnos son diferentes, se encuentran a una distancia comparable del referencial de la ciencia escolar.

Las anotaciones que hizo Adela en *Fp05* demuestran que copió las gráficas de Darío, escritas en el encerado. Por ejemplo, en la representación del proceso a volumen constante representó como variable independiente el tiempo, con la siguiente aclaración: "xq w ∄". No tenía claro que las gráficas se basan en la representación de pares de datos relacionados, y aunque en *Fp13* manifestó que conocía las variables dependiente e independiente, copió parte de la gráfica que hizo Rodrigo como ejemplo, y no rotuló los ejes. El hecho de que su representación, como la de Ana, superponga unos encima de otros los estados iniciales, hace ver que no supo plasmar los valores de la variable independiente de acuerdo con las ideas de la ciencia escolar.

En cuanto a Darío, la realización de sus gráficas está suficientemente descrita en los apartados sobre el desarrollo de *Fp05* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp05: calor de reacción, a V = cte y a p = cte*, pág. 623) y *Fp13* (*Aplicación y desarrollo de la actividad Fp13: dos productos de la combustión del carbón*, pág. 669). El principal problema de sus representaciones es la falta de legibilidad, por el pequeño tamaño de sus gráficas y la falta de convenios claros para rotular los ejes (a pesar de que copió la gráfica de *Fp13* de Adela y Ana).

Subnivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_{3a}$: esquema de Alfonso

Este alumno, que solamente realizó las gráficas de la actividad *Fp05*, las dibujó en un tamaño tan pequeño y las rodeó con retazos de la deducción de la definición matemática de ΔH. Tampoco llegó a escribir según los convenios científicos las ecuaciones termoquímicas.

Nivel $\boldsymbol{EA3}_{Fp} = p_2$: subniveles p_{2c} (Débora), p_{2b} (Ana) y p_{2a} (Berta)

Cada una de estas alumnas demostró dificultades diferentes en el desarrollo de las destrezas relacionadas con las representaciones gráficas:

Débora no utilizó como magnitud independiente la entalpía, ni llegó a relacionar con ella las variables energía interna y calor (que son las que situó en el eje vertical en las gráficas de *Fp05*). Tampoco utilizó adecuadamente las ecuaciones termoquímicas, y no llegó a trabajar los ciclos que pueden establecerse con ellas (recordemos que empezó a ausentarse a partir de *Fp07*).

En cuanto a Ana, sus gráficas están descritas en *Aplicación y desarrollo de la actividad Fp05: calor de reacción, a V = cte y a p = cte* (pág. 623) y *Aplicación y desarrollo de la actividad Fp13: dos productos de la combustión del carbón* (pág. 669). No llegó a tener claro que las gráficas entálpicas sirven para representar pares de datos mediante los que se relacionan los estados del sistema con sus correspondientes valores energéticos, simbolizados por los valores (relativos) de entalpía. En *Fp13*, aunque reconocía sin problemas la diferencia entre la entalpía y la variación de entalpía, así como la construcción de la escala relativa de entalpías, no tenía las destrezas matemáticas suficientes para plasmar esta diferencia conceptual de manera gráfica.

Para Berta, la representación gráfica del proceso a presión constante de *Fp05* debía ubicarse en el segundo cuadrante, porque la dependencia entre la energía interna y el trabajo a presión constante es inversa. Cuando vio que sus ideas se ponían en cuestión, se limitó a copiar un diagrama discontinuo en el que dibujó dos ejes sin rotular y dos líneas horizontales etiquetadas como "E1" y "E2", la primera situada a una altura mayor que la segunda y desplazada a la derecha con respecto a ésta. No modificó su gráfica del proceso a volumen constante, que mostraba una línea recta de pendiente negativa, con los ejes sin rotular. No realizó la

representación que se pedía en *Fp13*, y tampoco expresó las ecuaciones termoquímicas de acuerdo con la simbología deseable.

Nivel $EA3_{Fp}$ = p_1: esquema de Diana

Esta alumna no realizó ninguna representación gráfica a lo largo de la fase previa, y solamente activó, de acuerdo con las ideas de la ciencia escolar, las tres relaciones sobre la utilización de las ecuaciones termoquímicas para representar el balance energético global asociado a los procesos químicos.

Esquema *EA4*: *Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*

Se presentan aquí los esquemas de acción de ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la fase previa.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 32* recoge los esquemas de acción ***EA4*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las actividades de *Termoquímica*. En la *Tabla 32* se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** están representadas por el símbolo ***E***.

Tabla 32: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termoquímica*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	108	*E01*
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	108	*E02*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	108	*E03*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	142	*E04*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	141	*E05*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	129	*E06*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	41	*E07*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	116	*E08*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	115	*E09*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	19	*E10*
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	19	*E11*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	10	*E12*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	10	*E13*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	0	*E14*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOG. incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	10	*E15*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	20	*E16*

REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	20	*E17*
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	108	*E18*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	108	*E19*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	103	*E20*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	120	*E21*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	34	*E22*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	76	*E23*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	30	*E24*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	41	*E25*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{\text{reversible}}/T$ (MACROSCÓPICA)	0	*E26*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	0	*E27*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	32	*E28*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{\text{expansión}} = -p \cdot \Delta V$	21	*E29*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{\text{sistema}} = -\Delta E_{\text{entorno}}$	38	*E30*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	0	*E31*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	109	*E32*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	40	*E33*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	26	*E34*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	8	*E35*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	58	*E36*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	40	*E37*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	58	*E38*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	94	*E39*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	66	*E40*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	78	*E41*
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	115	*E42*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	110	*E43*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	23	*E44*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	0	*E45*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	58	*E46*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	94	*E47*
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	58	*E48*
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	94	*E49*
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	91	*E50*
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	93	*E51*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	25	*E52*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	31	*E53*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	11	*E54*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	15	*E55*
CRITERIOS MEDIOAMB. DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	19	*E56*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	38	*E57*
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	18	*E58*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	80	*E59*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	80	*E60*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	80	*E61*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	80	*E62*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	0	*E63*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	0	*E64*

CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	0	*E65*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	107	*E66*

El esquema referencial de acción *Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química* se compone de 66 relaciones, y los los estudiantes activaron 58. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la ***lectura comprensiva de las cuestiones planteadas*** para analizar los procesos y realizar inferencias, así como a la obtención de datos de fuentes bibliográficas y la transformación de datos mediante el tratamiento matemático de los datos numéricos. Destaca positivamente la interpretación de los resultados, para la cual se basaron en la ***realización de inferencias*** a partir de las ***dependencias de las magnitudes termodinámicas***, las cuales se expresan mediante ***ecuaciones matemáticas***. Destaca negativamente la baja frecuencia con la que recurrieron a fuentes bibliográficas alternativas a los enunciados de las tareas o a las tablas de datos termoquímicos; esta tendencia poco deseable está relacionada con los aspectos actitudinales, al igual que la baja frecuencua que se observa en la toma de decisiones fundamentada en criterios de tipo no termodinámico (sociales, medioambientales y tecnológicos).

En todo caso, las 8 relaciones del esquema referencial que no se utilizaron eran las ya esperadas: las que tratan los aspectos de espontaneidad y equilibrio, incluyendo las variaciones de las magnitudes entropía y energía de Gibbs y la ecuación fundamental de la Termodinámica.

Consideramos que los esquemas iniciales de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** son suficientes como para abordar el estudio de la Termodinámica Química partiendo de la Termoquímica. A pesar de que los conocimientos conceptuales de los alumnos no se pueden considerar satisfactorios para el nivel de 2º de Bachillerato, y en lo que se refiere al dominio microscópico las ideas iniciales no estaban lo suficientemente articuladas como para constituir esquemas de razonamiento útiles en la elaboración de interpretaciones profundas sobre las reacciones químicas, a lo largo de las quince actividades de la secuencia didáctica se observa un claro progreso en las destrezas y estrategias de resolución de problemas, paralela a la construcción de esquemas de razonamiento de mayor capacidad descriptiva e interpretativa.

De las 66 relaciones del esquema referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, 49 eran ya conocidas, por los cursos anteriores. Las frecuencias de activación f y sus correspondientes promedios de activación para estas relaciones conocidas y para las 17 relaciones nuevas son: $f_{(no\ nuevas)} = \mathbf{3223}$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = \mathbf{66}$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = \mathbf{43}$ y $f_{(nuevas)} = \mathbf{501}$, con $\bar{x}_{(nuevas)} = \mathbf{29}$, y $\sigma_{(nuevas)} = \mathbf{32}$. Si se seleccionan sólo las relaciones nuevas esperables, una vez eliminadas las que hacen referencia a la Termodinámica Química, el promedio de activación sube hasta

situarse en valores cercanos a los de las relaciones ya conocidas ($\bar{x}_{(nuevas;esperables)}$ **= 50**), mientras la desviación típica baja y se hace comparable a la de ellas $\sigma_{(nuevas;esperables)}$ **= 27**. Estos datos estadísticos indican que la secuencia didáctica ensayada ha tenido éxito en la construcción de un esquema de acción útil en la resolución de cuestiones problemáticas de base científica, teniendo en cuenta el nivel inicial de conocimientos conceptuales y procedimentales del alumnado.

La *Tabla 33* recoge información sobre la activación de las relaciones de *resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*, para cada una de las 15 actividades de la unidad sobre Termoquímica, tal y como se ha hecho para los demás esquemas (*Esquema* ***ER1**: **Sistemas termodinámicos***, pág. 716).

Recuérdese que se presentaron 11 alumnos a las actividades *Fp01* – *Fp07*, y 10 a las demás, con las excepciones de *Fp10* y *Fp11* (6 asistentes) y *Fp15* (5 asistentes). La muestra se considera compuesta de 11 individuos hasta *Fp08*, cuando la ausencia casi definitiva de Débora redujo el número de individuos a 10.

Tabla 33: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4)*** *en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Fp01	176	11	19	(12,19)
Fp02	*110*	*11*	*10*	*(10,10)*
Fp03	151	11	20	(9,18)
Fp04	262	11	28	(22,26)
Fp05	360	10	41	(0,40)
Fp06	*264*	*11*	*24*	*(23,23)*
Fp07	331	11	35	(20,34)
Fp08	352	10	37	(33,37)
Fp09	334	10	37	(8,37)
Fp10	*126*	*6*	*21*	*(21,21)*
Fp11	*132*	*6*	*22*	*(22,22)*
Fp12	337	10	36	(26,36)
Fp13	318	10	35	(27,35)
Fp14	369	10	42	(25,41)
Fp15	102	4	32	(0,31)

Como era de esperar, todas las actividades de *Termoquímica* condujeron a la activación de ***EA4***, y las frecuencias superan las 300 unidades en aproximadamente la mitad de la secuencia. La actividad de exploración *Fp05*, las de aplicación *Fp12*, *Fp13* y *Fp14* y la triada sobre calorimetría (*Fp07*, *Fp08* y *Fp09*) fueron las más eficaces en la promoción de las destrezas y estrategias en resolución de cuestiones problemáticas, lo que demuestra el éxito de la metodología ensayada para construir relaciones de la ciencia escolar que se transfieran eficazmente a la interpretación de los aspectos energéticos de procesos físicos y químicos diversos, en situaciones nuevas y en contextos diferentes. La transferencia de conocimientos se pone de manifiesto al comprobar el gran salto que se produce en la activación desde las

actividades de indagación/reestructuración *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11*, hacia las correspondientes actividades de aplicación: en todos los casos, los estudiantes adaptaron sus ideas a las nuevas situaciones, sin limitarse a poner en juego las relaciones que se habían trabajado en las actividades de indagación anteriores.

Los indicadores *f* y *R* apuntan hacia una activación creciente de las relaciones de ***EA4***, si se exceptúa la actividad *Fp15*, a la cual ya se ha dicho que la asistencia fue muy baja y el desempeño, apático e irregular. Las duplas *(mín,máx)* dan información valiosa que ayuda a afinar el perfil de activación a lo largo de la secuencia didáctica:

La dispersión de los datos baja a medida que se completa la primera sucesión de fases de exploración, indagación y aplicación (de *Fp01* a *Fp04*), al mismo tiempo que aumenta la frecuencia de activación de relaciones. Así pues, el primer ciclo de tres actividades ayudó a los alumnos en su conjunto a poner en marcha nuevas destrezas y estrategias de resolución de problemas. En *Fp05*, si se omite el dato *mín* = 0 debido a que Diana no realizó las tareas planteadas, la dupla se convierte en (33, 40), continuando la tendencia ascendente de activación de ***EA4*** incluso para los alumnos que menos relaciones utilizan. En las actividades sobre calorimetría, la dispersión baja de *Fp07* a *Fp08*, para a continuación crecer en *Fp09* debido a los problemas actitudinales que ya se han comentado. Desde *Fp12* hasta *Fp14*, los valores mínimo y máximo se apenas se mueven, como era de esperar, porque en estas actividades no se esperaba la construcción de nuevas relaciones en el esquema sino la activación de las ya existentes; se percibe una discreta tendencia, quizá, a la dicotomización de la muestra, aunque en ***EA4*** es más discreta que en los esquemas de razonamiento y que en ***EA2*** (*Esquema* ***EA2: Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, pág. 793); recordemos que de ***EA3*** no se dispone de datos suficientes para establecer tendencia, y en ***EA1*** se verificaba una homogeneización en la activación (*Esquema* ***EA1: Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos***, pág. 782), debida a la consolidación de las destrezas que permiten la identificación y descripción de los procesos. Los resultados de ***EA4***, pues, son consistentes con los de ***EA1*** en tanto en cuanto apuntan hacia una construcción de conocimientos procedimentales.

A medida que se realizaban las actividades, los ***ER***s y los ***EA***s de los alumnos se completaban, aunque se generó una cierta *estratificación* de los esquemas, en lo que podríamos denominar un proceso de aprendizaje a dos velocidades: algunos estudiantes avanzaron paralelamente en los ámbitos conceptual y procedimental, alcanzando buenos niveles de comprensión y transferencia de conocimiento, y otros, los que presentaron problemas de tipo actitudinal, desarrollaron de manera más irregular los esquemas de razonamiento que los de acción.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, se elaboraron los correspondientes

esquemas de acción de los alumnos, que aparecen recogidos en la *Tabla 34*, siguiendo la clave de símbolos habitual (*Tabla 9*, pág. 723). Los esquemas ***EA4*** se han categorizado en cuatro niveles *p*, de p_1 a p_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar), con dos subniveles para p_4 y tres para p_2.

Tabla 34: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción ***EA4***, ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_4				p_3		p_2				p_1
	p_{4b}	p_{4a}					p_{2c}		p_{2b}	p_{2a}	
ALUMNOS	**Benito**	**Carlos**	**Brais**	**Adela**	**Ana**	**Darío**	**Clara**	**Berta**	**Alfonso**	**Diana**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓
OTRAS FUENTES DE INFO. incluyen la INTERNET	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{reversible}/T$ (MACROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{expansión} = -p \cdot \Delta V$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EC. MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{sistema} = -\Delta E_{entorno}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOD.: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓	💣	💣	💣	💣	💣	💣	💣	💣	💣	✖
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✓	✓	✓	💣	✖	✖	✖	✖	✖	·	✖
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORM. DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMOD. se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓	💣	💣	💣	✓
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

CRITERIOS TERMOD. DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMOD. DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

A continuación se describen los esquemas ***EA4*** prototípicos de cada nivel de ordenación, y se comenta su categorización en los niveles $\boldsymbol{EA4_{Fp}} = [p_1,...,p_4]$.

Nivel $\boldsymbol{EA4_{Fp}} = \boldsymbol{p_4}$: subniveles p_{4b} y p_{4a}

Este nivel está compuesto por dos subniveles, p_{4b} y p_{4a}, siendo el primero el más acorde con la ciencia escolar.

Subnivel $\boldsymbol{EA4_{Fp}} = p_{4b}$: esquema ***EA4*** de Benito

Este alumno no tuvo grandes dificultades para activar 58 de las 59 relaciones de ***EA4*** que se esperaba construir en la fase previa; la única relación que no utilizó fue la relacionada con la búsqueda de información en Internet, a la que, como ya se ha indicado, ningún estudiante recurrió, por razones que tienen que ver con las actitudes negativas. Dado que no activación de esta relación no resta capacidad al esquema ***EA4*** para resolver problemas en Termoquímica, se puede considerar que Benito puso en juego destrezas y estrategias útiles en la interpretación de los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos.

Subnivel $\boldsymbol{EA4_{Fp}} = p_{4a}$: esquemas ***EA4*** de Carlos, Brais y Adela

Los tres estudiantes de este subnivel tienen ***EA4*** muy similares. Como Benito, no utilizaron la relación ***E14***, aunque, a diferencia de él, demostraron alguna dificultad en la utilización de las representaciones algebraicas en el tratamiento matemático de los datos numéricos.

Brais manifestó ciertos problemas para expresar matemáticamente la dependencia del calor involucrado en los procesos con respecto a la masa, la naturaleza del sistema y la diferencia de temperatura experimentada por el mismo ($q = m \cdot c_e \cdot \Delta T$). Adela partía de una base matemática poco consistente como para realizar las representaciones gráficas que se pedían en *Fp05*, aunque, como ya se ha explicado, superó sus dificultades mejor que los alumnos que se encuentran en los niveles $\boldsymbol{EA4_{Fp}}$ inferiores.

Nivel $\boldsymbol{EA4_{Fp}} = \boldsymbol{p_3}$: esquemas de Ana y Darío

Tuvieron problemas para realizar las representaciones gráficas de la fase previa, y les costó utilizar adecuadamente el lenguaje matemático para simolizar los aspectos termodinámicos de los procesos. En general, todos los alumnos manifestaron durante la fase previa este tipo de dudas, aunque Débora fue la única que no las superó en un grado razonable.

Nivel $EA4_{Fp}$ = p_2: subniveles p_{2b}: y p_{2a}

Este nivel está compuesto por dos subniveles, cada uno de ellos con dos esquemas idiosincrásicos.

Subnivel $EA4_{Fp}$ = p_{2b}: esquemas ***EA4*** de Clara y Berta

Además de no superar en un grado adecuado las dificultades con las representaciones gráficas, estas alumnas manifestaban bastantes dudas sobre la simbología matemática, lo que probablemente tiene una influencia directa en sus dudas sobre el papel de la variación de entalpía como criterio termodinámico que ayuda a analizar el balance global de los intercambios energéticos entre sistema y entorno. Aunque Berta fue la única estudiante de la muestra que demostró utilizar adecuadamente las cifras significativas para expresar el resultado numérico de cálculos realizados a partir de datos experimentales, al principio de la fase previa le costaba utilizar las expresiones matemáticas para expresar las dependencias entre magnitudes físicas. Parece que esta alumna estaba más familiarizada que sus compañeros con los conocimientos puntuales sobre métodos de aproximación y estimación numérica, y en el laboratorio expresó en repetidas ocasiones su afán por realizar medidas experimentales lo más precisas posible, preguntando sobre la manera de enrasar volúmenes de líquidos y el procedimento para que el termómetro de laboratorio "bajase" de valor hasta colocarse en la que ella consideraba la posición *correcta* para realizar la medida, la de los termómetros clínicos, y para agitar la mezcla de disolución para homogeneizar la temperatura del sistema. Sin embargo, a diferencia de alguno de sus compañeros, no se obsesionó con realizar una pesada exacta hasta las milésimas de gramo, lo que indica que conocía acciones de la práctica experimental que los demás no habían aprendido.

Subnivel $EA4_{Fp}$ = p_{2a}: esquemas ***EA4*** de Alfonso y Diana

La principal diferencia del esquema de Alfonso con respecto a los de sus compañeros es que este alumno no hizo explícita de manera adecuada la idea de que la contaminación atmosférica que producen las reacciones de combustión depende de la cantidad de dióxido de carbono emitido por cantidad de combustible utilizado. También manifestó el mismo tipo de dificultades que los estudiantes del nivel p_3, aunque en su caso éstas se dilataron algo en el tiempo, por el escaso afán de trabajo que demostraba Alfonso. En cuanto a Diana, otra alumna de escaso desempeño en las clases, nunca utilizó el libro de texto para consultar las tablas de datos termoquímicos, sino que pedía los datos a su compañero Darío; por este motivo hemos optado por considerar que no activó la relación ***I14*** (y tampoco la ***I13***, porque no utilizó otras fuentes alternativas de información), aunque es posible que no tuviera problemas para identificar los datos adecuados para resolver las cuestiones numéricas. Además, no realizó ninguna representación gráfica en la fase previa, y tuvo dificultades para expresar las dependencias entre conceptos teóricos utilizando las expresiones matemáticas.

Nivel $EA4_{Fp} = p_1$: esquema *EA4* de Débora

Débora tiene esquema idiosincrásico ***EA4*** más incompleto, lo que no es de extrañar, teniendo en cuenta que faltó a la segunda mitad de las actividades de la secuencia didáctica, y que el desarrollo de destrezas y estrategias de alto nivel requiere más tiempo que la activación de relaciones en los esquemas de razonamiento o en esquemas de acción que representen destrezas de menos demanda cognitiva. Esta alumna nunca llegó a trabajar con datos termoquímicos ni consultó otro tipo de información para realizar las actividades, no llegó a desarrollar las ideas contenidas en las ecuaciones termoquímicas para integrarlas en el tratamiento matemático, ni realizó las actividades de cálculo e interpretación de los resultados experimentales de las calorimetrías realizadas. Aunque en su esquema aparecen activadas las relaciones que se refieren a los criterios socioeconómicos, tecnológicos y ambientales que permiten tomar decisiones sobre los aspectos energéticos de los procesos, estos datos de activación se corresponden con la estimación teórica de activación que se realizó para la actividad *Fp06*, a la que Débora asistió. No sucede lo mismo con sus compañeros, que en *Fp14* demostraron utilizar estos criterios de manera más o menos autónoma en un nivel aceptable para las destrezas argumentativas que desplegaban.

El absentismo de Débora a partir de la actividad *Fp08* impidió disponer de información sobre la superación de sus ideas alternativas relacionadas con las representaciones algebraicas y gráficas, aunque es de esperar que no se produjeran grandes avances a este respecto, teniendo en cuenta que Débora no ponía de su parte ni trabajo personal ni actitudes favorables al proceso de aprendizaje.

III.3.2. Análisis mediante competencias

En este apartado se analizan las competencias que desarrollaron los alumnos a lo largo de las actividades que conforman la primera secuencia didáctica ensayada, *Termoquímica*. Se evalúan seis competencias (competencia científica, competencia matemática, competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, competencia social y ciudadana, competencia en comunicación lingüística y competencia en aprender a aprender), con especial énfasis en la competencia científica, que se ha desglosado en el siguiente conjunto de competencias (capacidades) más concretas:

- **CC_1**: Identificación de cuestiones científicas
  - **CC_{1A}**: Reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia
  - **CC_{1B}**: Reconocer la base científica de la cuestión, identificando los conocimientos de la Ciencia y sobre la Ciencia necesarios para abordarla
  - **CC_{1C}**: Utilizar estrategias de búsqueda de información científica, comprenderla y seleccionarla

- **CC_{1B1}**: Identificar los conocimientos sobre los que se desea buscar información, y seleccionar entre las fuentes de información disponible aquéllas más adecuadas (completas, fiables...)
- **CC_{1B2}**: Comprender y asimilar la información encontrada
- **CC_{1B3}**: Seleccionar aquellas informaciones de mayor calidad y fiabilidad científica para dar respuesta a la cuestión planteada

▪ **CC_{1C}**: Reconocer los rasgos claves de la investigación científica: relevancia, emisión de hipótesis, variables incidentales y de control, diseño de experiencias y realización de experiencias. Búsqueda de regularidades

- **CC_{1C1}**: Reconocer los rasgos clave de la emisión de hipótesis
- **CC_{1C2}**: Reconocer los rasgos clave de la elaboración de diseños experimentales
- **CC_{1C3}**: Reconocer los rasgos clave de la realización de experiencias
- **CC_{1C4}**: Reconocer los rasgos clave del contraste de hipótesis
- **CC_{1C5}**: Reconocer los rasgos clave de la comunicación de las experiencias

❑ **CC_2**: Explicación científica de los fenómenos

▪ **CC_{2A}**: Aplicar los conocimientos de la Ciencia a una situación determinada (transferir los conocimientos a diversos fenómenos y situaciones)

▪ **CC_{2B}**: Describir y explicar fenómenos científicamente y predecir cambios

- **CC_{2B1}**: Elaborar y evaluar descripciones científicas
- **CC_{2B2}**: Elaborar y evaluar explicaciones (y justificaciones) científicas
- **CC_{2B3}**: Elaborar y evaluar predicciones científicas

▪ **CC_{2C}**: Reconocer descripciones, explicaciones y predicciones pertinentes

- **CC_{2C1}**: Identificar descripciones científicas
- **CC_{2C2}**: Identificar explicaciones científicas
- **CC_{2C3}**: Identificar predicciones científicas

❑ **CC_3**: Utilización de pruebas científicas

▪ **CC_{3A}**: Interpretar datos y pruebas científicas, elaborar y comunicar conclusiones que constituyan la base de decisiones científicamente fundamentadas sobre los fenómenos naturales

- **CC_{3A1}**: Acceder a información científica (datos y pruebas). Seleccionar e interpretar los datos y pruebas disponibles
- **CC_{3A2}**: Elaborar argumentos a favor o en contra de las afirmaciones planteadas
- **CC_{3A3}**: Evaluar los argumentos construidos
- **CC_{3A4}**: Saber reconocer si se dispone o no de información suficiente para extraer conclusiones definitivas
- **CC_{3A5}**: Extraer conclusiones basándose en las pruebas disponibles

- **CC_{3A6}**: Tomar decisiones basándose en conclusiones válidas
- **CC_{3A7}**: Expresar y comunicar las conclusiones y decisiones

▪ **CC_{3B}**: Argumentar en pro y en contra de las conclusiones, e identificar los supuestos, las pruebas y los razonamientos en la obtención de los mismos

- **CC_{3B1}**: Evaluar las conclusiones a la luz de argumentos científicos
- **CC_{3B2}**: Evaluar los argumentos que avalan las conclusiones, a la luz de la fiabilidad y especificidad de las pruebas disponibles
- **CC_{3B3}**: Reconocer las afirmaciones sobre el conocimiento que permiten obtener conclusiones a partir de las pruebas
- **CC_{3B4}**: Seleccionar conclusiones alternativas en función de las pruebas disponibles. Argumentar en pro y en contra de las conclusiones según los procesos empleados para llegar a ellas

▪ **CC_{3C}**: Reflexionar sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos

- **CC_{3C1}**: Tomar conciencia de las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos
- **CC_{3C2}**: Elaborar y evaluar argumentos a favor y en contra de las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos
- **CC_{3C3}**: Tomar decisiones atendiendo a la viabilidad, los riesgos y las ventajas de las distintas propuestas planteadas

❑ **CC_4**: Actitudes hacia la Ciencia

De las manifestaciones escritas y orales que produjeron los estudiantes en sus respuestas a las actividades de la secuencia didáctica *Termoquímica*, se han extraído los elementos de la competencia (unidades de análisis) que vertebran cada una de las competencias (capacidades) descritas. Los elementos principales de la competencia (***EPC***s) se listan en el anexo del ***Volumen B***.

A cada elemento de la competencia se le adjudicó una puntuación numérica que se obtiene mediante la suma de las puntuaciones de los dos indicadores de la competencia (***IC***s); éstas, a su vez, se obtienen mediante la suma de los valores de los factores de la competencia (***FC***s) que se presentaron en el ***Volumen A***:

❑ **Indicador** ***IC_1, potencialidad interpretativa del conocimiento***: es independientede la tarea planteada y del contexto de su realización, y se refiere a las características ontológicas y epistemológicas de los conocimientos científicos.

▪ ***Dominio de representación del conocimiento*** (***IC_1fc_1***): analiza la utilización de las representaciones macroscópicas, microscópicas y simbólicas, mediante los valores numéricos para las ideas del dominio simbólico, ***IC_1fc_1***[S] = 0, macroscópico, ***IC_1fc_1***[M] = 1, microscópico, ***IC_1fc_1***[m] = 2 y para la integración de los dominios macro y microscópico ***IC_1fc_1***[Mm] = 3.

- ***Modelo*** (***IC$_1$fc$_2$***): se aplica a las unidades de análisis del dominio microscópico que se adscriben a los modelos que interesa construir, que son los de partículas (***IC$_1$fc$_2$***[P] = 1), enlace (***IC$_1$fc$_2$***[E] = 2) y reacción química (***IC$_1$fc$_2$***[R] = 3).

- ***Categoría ontológica*** (***IC$_1$fc$_3$***): pretende averiguar si los alumnos asignan atributos ontológicos adecuados a los constructos termodinámicos, así que clasifica las entidades en función de los principios ontológicos que denominamos objetos (***IC$_1$fc$_3$***[O] = 1), estados (***IC$_1$fc$_3$***[E] = 2) y procesos (***IC$_1$fc$_3$***[P] = 3).

- ***Operación epistémica*** (***IC$_1$fc$_4$***): los procesos cognitivos básicos se organizan en varias categorías, que son las definiciones (***IC$_1$fc$_4$***[Def]), las caracterizaciones (***IC$_1$fc$_4$***[Crc]) y las interpretaciones (***IC$_1$fc$_4$***[Int]). Se distinguen definiciones básicas (***IC$_1$fc$_4$***[Def(B)] = 1) y completas (***IC$_1$fc$_4$***[Def(C)] = 2); dos tipos de caracterizaciones, las descripciones (***IC$_1$fc$_4$***[Crc(D)] = 2), y las clasificaciones (***IC$_1$fc$_4$***[Crc(C)] = 3); y tres clases de interpretaciones, las explicaciones (***IC$_1$fc$_4$***[Int(E)] = 3), las justificaciones (***IC$_1$fc$_4$***[Int(J)] = 4) y las predicciones (***IC$_1$fc$_4$***[Int(P)] = 5).

- **Indicador *IC$_2$, potencialidad de activación del conocimiento***: permite estimar la capacidad de una determinada actividad o prueba para promover la utilización de las ideas científicas por parte del alumnado.

  - ***Importancia en la resolución de la cuestión planteada*** (***IC$_2$fc$_1$***): analiza la importancia que tienen las ideas de la ciencia escolar en la resolución de la tarea, si son imprescindibles para resolver la cuestión (***IC$_2$fc$_1$***[I] = 3), si son relevantes (***IC$_2$fc$_1$***[R] = 2), o si son complementarios (***IC$_2$fc$_1$***[C] = 1).

  - ***Novedad*** (***IC$_2$fc$_2$***): analiza cuánto tardan los estudiantes en incorporar los nuevos conocimientos nuevos (***IC$_2$fc$_2$***[N] = 3), los que se han trabajado en una o dos actividades (***IC$_2$fc$_2$***[P] = 2) y los que se consideran conocidos (***IC$_2$fc$_2$***[C] = 1).

  - ***Explicitación en el planteamiento de la tarea*** (***IC$_2$fc$_3$***): indica si la unidad de análisis aparece (***IC$_2$fc$_3$***[S] = 0) o no (***IC$_2$fc$_3$***[N] = 1) en el enunciado de la tarea, con la finalidad de comprobar hasta qué punto los alumnos elaboran razonamientos argumentativos cuyas ideas clave no se les facilitan en los materiales de trabajo.

  - ***Fuente de información*** (***IC$_2$fc$_4$***): hace referencia a la calidad y variedad de las fuentes de las que los alumnos deben extraer información en la que fundamentar sus razonamientos, desde las ideas que aporta el profesor (***IC$_2$fc$_4$***[D] = 1), pasando por las que se recogen en las tablas de datos (***IC$_2$fc$_4$***[T] = 2), las que se rescatan de actividades pasadas (***IC$_2$fc$_4$***[A] = 3), las que se consultan en el libro de texto (***IC$_2$fc$_4$***[L] = 4), las que se buscan en Internet (***IC$_2$fc$_4$***[I] = 5), hasta las ideas de elaboración propia (***IC$_2$fc$_4$***[E] = 6).

- ***Factor de resolución de cuestiones científicas, fc$_{_}$***): se evalúa tanto independientemente como en función de la tarea planteada, y hace referencia a las etapas de investigación científica, desde la formulación de hipótesis (***fc$_{_}$*** = 1)

hasta su contraste, pasando por la transformación de los datos ($fc_{\leftarrow}$ = 2), la obtención de resultados ($fc_{\leftarrow}$ = 3) y la elaboración de conclusiones ($fc_{\leftarrow}$ = 4) y la toma de decisiones ($fc_{\leftarrow}$ = 5) sobre las hipótesis. Permite estudiar hasta qué punto los alumnos son capaces de dar respuesta a una cuestión científica utilizando sus conocimientos sobre la base de una estrategia de resolución de problemas, y en qué etapas de la resolución tienden a presentarse dificultades.

Para la evaluación de los aspectos actitudinales no se utilizaron los ***IC***s, sino que se valoró el grado voluntario de asistencia a las clases, la participación en los debates en pequeño y gran grupo y el desempeño en el trabajo personal, además del desarrollo de una relación de diálogo con los compañeros y el profesor, y la continuación del trabajo personal fuera del aula. A estas unidades de análisis se les adjudicaron puntuaciones según la siguiente escala:

- **Actitudes sobre la Ciencia**
  - **Valoración personal y social de la Ciencia y el trabajo científico**
    - Valoran la Ciencia como una actividad interesante desde el punto de vista personal (tienen interés en la actividad científica como orientación profesional, reto intelectual o disfrute personal). *Valores*: {0,1}
    - Valoran la Ciencia como una actividad interesante desde el punto de vista del desarrollo de las sociedades humanas. *Valores*: {0,1}
  - **Demostración de los aspectos actitudinales (actitudes, valores , normas) característicos del trabajo científico**
    - Demuestran honradez y transparencia en su trabajo. *Valores*: {0,1}
    - Demuestran paciencia y flexibilidad en su trabajo. *Valores*: {0,1}
- **Actitudes sobre la enseñanza y el aprendizaje de la Ciencia**
  - **Desarrollo de la autorregulación y la responsabilidad sobre el aprendizaje**
    - Asistencia a clase. *Valores*: {0,1}
    - Atención al trabajo en el aula. *Valores*: {0,1,2}
    - Participación en los debates en pequeño grupo. *Valores*: {0,1,2,3}
    - Participación en los debates en gran grupo. *Valores*: {0,1,2,3}
    - Desarrollo de una relación de diálogo con los compañeros. *Valores*: {0,1,2}
    - Desarrollo de una relación de diálogo con el profesor. *Valores*: {0,1,2}
    - Desarrollo de actitudes hacia la superación de obstáculos de aprendizaje. *Valores*: {0,1,2}
    - Demuestran interés y esfuerzo por el trabajo del aula. *Valores*: {0,1,2,3}
    - Demuestran una continuación del trabajo fuera del aula. *Valores*: {0,1,2,3}
    - Desarrollan autonomía y confianza en el trabajo. *Valores*: {0,1,2,3}
    - Demuestran interés y esfuerzo por mejorar el trabajo. *Valores*: {0,1,2,3}

- **Valoración personal y social de la enseñanza y el aprendizaje de la Ciencia**

  - Valoración social de la enseñanza y el aprendizaje de la Ciencia. *V.*: {0,1}
  - Valoración personal de la enseñanza y el aprendizaje de la Ciencia. *Valores*: {0,1}
  - Valoración del trabajo del docente como guía del proceso de aprendizaje. *Valores*: {0,1}
  - Valoración personal de la enseñanza y el aprendizaje de la termodinámica como disciplina clave en Ciencias. *Valores*: {0,1}

- **Valoración de la propuesta de enseñanza presentada de acuerdo con las actitudes demostradas en el trabajo de aula**

  - Utilidad de la propuesta para el aprendizaje. *Valores*: {0,1}
  - Utilidad de la propuesta en el desarrollo de relaciones personales. *V.*: {0,1}
  - Utilidad de la propuesta para la valoración de la Termodinámica, de la Química y de la Ciencia (desarrollo de interés hacia la Ciencia y su aprendizaje). *Valores*: {0,1}

Las competencias de cada alumno para una actividad o prueba dada se calcularon sumando los valores de los ***IC***s adjudicados a los elementos de la competencia que articulan las distintas competencias (capacidades). Una vez calculadas las competencias de los alumnos (idiosincrásicas), se compararon con dos valores que denominamos referenciales de competencia (***VRC***), y que fueron elaborados por los investigadores de tal manera que permiten definir cinco niveles de competencia, en lugar de los seis niveles de PISA 2006 (OCDE, 2006a):

- El primer valor referencial de competencia $\boldsymbol{VRC_1}$ representa la mínima movilización de conocimiento científico necesaria para dar respuesta a las cuestiones planteadas. Se estableció sumando los valores de los ***IC***s, de los $\boldsymbol{fc_{i\to}}$ y de las puntuaciones actitudinales que se consideran imprescindibles para resolver la cuestión.
- El segundo valor referencial de competencia $\boldsymbol{VRC_2}$ estima un grado de movilización de conocimiento más que suficiente para resolver las cuestiones, y se estableció sumando los valores de los ***IC***s, de los $\boldsymbol{fc_{i\to}}$ y de las puntuaciones actitudinales que se consideran imprescindibles para resolver la cuestión, más la mitad de la que corresponde a los elementos relevantes. Los alumnos que superan este nivel de competencia despliegan una cantidad y calidad de conocimiento tal que llegan al máximo de competencia $\boldsymbol{NC_5}$.

Los cinco niveles de competencia, $\boldsymbol{NC_1}$,…, $\boldsymbol{NC_5}$, ordenan en sentido creciente las capacidades que se espera que los alumnos utilicen para dar respuesta a las cuestiones planteadas, en comparación con el conocimiento científico que se deseaba promover. Los ***NC***s quedan delimitados en función de la distancia entre los dos valores de competencia referenciales $\boldsymbol{VRC_1}$ y $\boldsymbol{VRC_2}$:

- **Nivel de competencia mínimo** NC_1: queda situado por debajo del valor referencial VRC_1. Los alumnos se encuentran en el nivel mínimo de competencia no resuelven la cuestión con una eficacia aceptable.
- **Segundo nivel de competencia** NC_2: queda situado por encima del valor referencial VRC_1, entre éste y un tercio de la distancia que separa VRC_1 de VRC_2. Los alumnos se encuentran en el nivel mínimo de competencia resuelven la cuestión con una eficacia aceptable, aunque baja.
- **Tercer nivel de competencia** NC_3: queda situado entre un tercio y dos tercios de la distancia que separa VRC_1 de VRC_2. Los alumnos se encuentran en el nivel resuelven la cuestión con una eficacia que se puede considerar media.
- **Cuarto nivel de competencia** NC_4: queda situado inmediatamente debajo del valor referencial VRC_2, entre éste un tercio de la distancia que lo separa de VRC_1. Los alumnos se encuentran en el nivel de competencia resuelven la cuestión con bastante eficacia.
- **Nivel de competencia máximo** NC_5: queda situado por encima del valor referencial VRC_2. Los alumnos se encuentran en el nivel máximo de competencia resuelven la cuestión con muy buena eficacia.

La determinación de los niveles de competencia alcanzados en las distintas actividades y pruebas se realiza mediante la comparación de los valores de competencia idiosincrásicos con los valores referenciales de la ciencia escolar; pero ello, permite estimar en qué grado se dirigió la evolución de los conocimientos de los alumnos hacia posturas más acordes con las científicas, y qué capacidades o factores del conocimiento científico se han desarrollado en mayor o menor medida dependiendo de la tarea realizada. En este sentido, el método de análisis del aprendizaje por competencias ofrece a los investigadores valiosa información sobre la capacidad de las propuestas didácticas para promover aprendizaje.

A continuación se detallan los resultados del análisis del aprendizaje que realizaron los alumnos como consecuencia de su interacción con la primera unidad didáctica ensayada, *Termoquímica*, en términos de las competencias que pusieron en juego en sus respuestas a las quince actividades propuestas. En las tablas que vienen a continuación se recogen los valores medios de los niveles de las competencias que alcanzaron los alumnos a lo largo de la fase previa, valores aproximados por redondeo a la unidad, que se han hallado calculando el promedio estadístico de los niveles de competencia $NC = NC_1,\ldots,NC_5$ para las 11 actividades de la secuencia de *Termoquímica* en las que se elaboran respuestas escritas a cuestiones científicas. Se han excluido de los cálculos las actividades de indagación/reestructuración *Fp02*, *Fp06*, *Fp10* y *Fp11*, para las que no se han realizado estimaciones, con la finalidad de limitar el análisis lo más posible a las actividades en las que los estudiantes tenían que realizar un esfuerzo muy activo en la puesta en juego de sus conocimientos.

Tabla 35: promedio de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en el conocimiento e interacción con el mundo físico	**3**	**3**	**3**	**3**	**2**	**3**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,73**	**1,01**
Identificación de cuestiones científicas	**4**	**4**	**3**	**4**	**2**	**3**	**4**	**2**	**4**	**4**	**1**	**3,18**	**1,08**
Reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia	**4**	**4**	**3**	**4**	**2**	**3**	**4**	**2**	**4**	**4**	**1**	**3,18**	**1,08**
Reconocer la base científica de la cuestión (conocimientos de la Ciencia y sobre la Ciencia)	**5**	**5**	**4**	**5**	**4**	**4**	**5**	**3**	**4**	**5**	**1**	**4,09**	**1,22**
Utilizar estrategias de búsqueda de información científica, comprenderla y seleccionarla	**5**	**4**	**3**	**5**	**2**	**3**	**4**	**2**	**4**	**5**	**1**	**3,45**	**1,37**
Reconocer los rasgos claves de la investigación científica	**4**	**4**	**4**	**4**	**3**	**4**	**5**	**1**	**4**	**5**	**3**	**3,73**	**1,10**
Explicación científica de los fenómenos	**4**	**5**	**5**	**4**	**4**	**5**	**5**	**1**	**5**	**5**	**5**	**4,36**	**1,21**
Aplicar (transferir) los conocimientos de la Ciencia	**5**	**4**	**4**	**5**	**2**	**4**	**5**	**2**	**4**	**5**	**1**	**3,73**	**1,42**
Describir y explicar fenómenos científicamente y predecir cambios	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**4**	**5**	**2**	**5**	**5**	**4**	**4,45**	**0,93**
Reconocer descripciones, explicaciones y predicciones	**3**	**3**	**2**	**3**	**2**	**2**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,36**	**0,81**
Utilización de pruebas científicas	**4**	**4**	**2**	**4**	**2**	**2**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,82**	**1,25**
Interpretar datos y pruebas, elaborar y comunicar conclusiones	**5**	**5**	**4**	**5**	**3**	**4**	**4**	**2**	**4**	**5**	**1**	**3,82**	**1,33**
Argumentar en pro y en contra de las conclusiones, e identificar supuestos, pruebas y razonamientos	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,36**	**0,50**
Reflexionar sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1,64**	**0,50**
Actitudes hacia la Ciencia	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1,45**	**0,52**
Interés hacia la Ciencia y la actividad científica. Apoyo a la investigación científica. Concepción de Ciencia	**3**	**3**	**3**	**3**	**2**	**3**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,73**	**1,01**
Sentido de la responsabilidad sobre sí mismo, los recursos y el entorno	**3**	**3**	**2**	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,45**	**0,69**

Según la *Tabla 35*, todos los alumnos salvo Diana y Débora alcanzaron un buen nivel de la competencia científica (el de Carlos es aceptable, aunque bajo). De las tres competencias (capacidades) científicas, el promedio de la muestra casi adquirió el nivel NC_3 (medio) en la identificación de cuestiones científicas. Obtuvieron un buen nivel en el reconocimiento de cuestiones científicamente investigables, en la identificación de la base científica de la cuestión y en la aplicación de los rasgos claves de la investigación; obsérvese que todos estos datos presentan un paralelismo con los buenos resultados obtenidos en ***ER1***, ***ER3*** y ***EA4***, respectivamente.

En conjunto, los alumnos tienen un NC_3 en la explicación científica de los fenómenos, y en las competencias más concretas que se identifican dentro de CC_2 se observa que la transferencia de los conocimientos adquiridos a la interpretación de los aspectos energéticos de nuevos hechos y fenómenos presenta un nivel medio-alto para el conjunto de la muestra. Aunque se trata de resultados muy buenos, no hay que olvidar que en las actividades los alumnos contaron con la ayuda del profesor, y que habrá de esperarse a la caracterización inicial ***Ci*** para verificar qué conocimientos están en la zona de desarrollo real.

La tercera de las capacidades, utilización de pruebas científicas, arroja resultados más dispares: se sitúa, para el conjunto de la muestra, en el nivel NC_2, con seis alumnos que alcanzan NC_3 (Ana, Alfonso, Benito, Adela, Clara y Darío); las competencias más concretas tienen valores altos, que se explican por la elaboración de razonamientos y la construcción de interpretaciones en un entorno colaborativo, en el que unos estudiantes ayudaban a otros (una vez que el profesor les abría la posibilidad de aplicar los conocimientos, acotándoles el problema). No obstante, la reflexión sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos no es adecuada, porque a pesar de todas las facilidades que se les dieron, los estudiantes no realizaron el esfuerzo de buscar información y discutirla.

En cuanto a las actitudes, los datos de Brais, Carlos, Berta y Débora se consideran deficientes; los demás presentan un nivel NC_2 aceptable por la mínima. En la competencia (capacidad) que mide el sentido de la responsabilidad destacan, con un NC_3, Ana, Alfonso, Benito, Adela, Clara y Darío, por su mayor constancia en el trabajo de aula y en el estudio fuera de clase.

Tabla 36: promedio de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia matemática	**4**	**4**	**3**	**4**	**1**	**4**	**4**	**3**	**4**	**4**	**1**	**3,27**	**1,19**
Identificar situaciones que exigen conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos	**5**	**5**	**4**	**5**	**2**	**5**	**5**	**3**	**5**	**5**	**1**	**4,09**	**1,45**
Utilizar el lenguaje matemático para cuantificar aspectos relacionados con los fenómenos naturales	**5**	**5**	**5**	**5**	**2**	**5**	**5**	**3**	**4**	**5**	**1**	**4,09**	**1,45**
Utilizar técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar expresar datos e ideas	**5**	**5**	**3**	**5**	**1**	**4**	**5**	**5**	**3**	**5**	**1**	**3,82**	**1,60**
Realizar cálculos sobre los fenómenos naturales	**5**	**5**	**4**	**5**	**2**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**4,27**	**1,42**
Realizar representaciones gráficas sobre fenómenos naturales	**3**	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**4**	**4**	**1**	**2,18**	**1,40**

Todos los alumnos salvo Carlos y Débora alcanzan o superan el nivel medio (NC_3). La eficacia en la aplicación del lenguaje y los razonamientos matemáticos es máxima para prácticamente todos los alumnos; estos resultados con consistentes con la elevada activación de los esquemas de acción ***EA2***. Todas las capacidades tienen un promedio adecuado salvo en las representaciones gráficas, en las que sólo la mitad de los estudiantes se acercan a los niveles aceptables, con nivel superior a la media solamente para Alfonso, Clara y Darío.

Tabla 37: promedio de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y comeptencia en el tratamiento de la información y comepetencia digital, que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en comunicación lingüística	**4**	**3**	**4**	**3**	**2**	**3**	**4**	**3**	**4**	**4**	**2**	**3,27**	**0,79**
Comprender e interpretar mensajes acerca de las Ciencias	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**4,91**	**0,30**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos con contenido científico	**5**	**3**	**3**	**4**	**2**	**2**	**4**	**3**	**4**	**4**	**1**	**3,18**	**1,17**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la comunicación de ideas (saber decir)	**5**	**3**	**3**	**4**	**2**	**2**	**4**	**3**	**4**	**4**	**1**	**3,18**	**1,17**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción del conocimiento (saber hacer)	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**1**	**5**	**5**	**5**	**3,18**	**2,09**
Saberes actitudinales relacionados con las tareas comunicativas: utilizar el lenguaje de forma razonada y dialogante en la regulación de conductas y emociones	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**4,64**	**1,21**
Competencia en el tratamiento de la información y Competencia digital	**5**	**5**	**4**	**5**	**4**	**4**	**4**	**3**	**4**	**5**	**2**	**4,09**	**0,94**
Aplicar las formas específicas del trabajo científico para buscar, recoger, seleccionar la información, procesarla y presentarla	**5**	**5**	**4**	**5**	**4**	**4**	**4**	**3**	**4**	**5**	**2**	**4,09**	**0,94**
Utilizar las TIC para comunicarse, recabar información, visualizar situaciones, obtener y tratar datos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los niveles de competencia lingüística se consideran medios en conjunto, y destacan los valores de Ana, Brais, Adela, Clara y Darío, que se esforzaron especialmente en mejorar su expresión escrita. Hay que puntualizar que apenas se ha indagado en aspectos más allá de la utilización del lenguaje científico, y en este sentido, los alumnos de la muestra llegaron a interpretar mensajes de contenido científico y a utilizar el vocabulario científico para expresar sus ideas, pero la utilización adecuada del lenguaje en general, en la construcción de conocimiento, es

muy irregular: Brais, Berta, Adela, Clara y Darío llegan a los niveles máximos de expersión, pero invirtiendo mucho tiempo y esfuerzo en escoger las palabras y organizarlas para generar un discurso coherente y ordenado. Recuérdese que estos estudiantes tenían un vocabulario y una sintaxis bastante pobres para su edad, y en general no dominaban aspectos básicos de la expresión escrita, como la puntuación o la ortografía.

En cuanto a la búsqueda de información y su selección, procesamiento y presentación, alcanzan un buen nivel de competencia, pero no hay que olvidar que estos datos están directamente influidos por la ayuda del experto (Rodrigo). En su trabajo estrictamente autónomo, los alumnos truncaban el proceso de trabajo científico antes de empezar la etapa de la búsqueda de información.

Tabla 38: promedio de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en la fase previa a la intervención

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia social y ciudadana	**3**	**3**	**1**	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**3**	**2**	**1**	**2,00**	**0,89**
Comprender y explicar de manera científica problemas de interés social	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Aplicar el conocimiento sobre debates esenciales para el avance de la Ciencia, para comprender cómo han evolucionado las sociedades y para analizar la sociedad actual	**5**	**4**	**1**	**5**	**3**	**1**	**3**	**1**	**4**	**3**	**1**	**2,82**	**1,60**
Comportarse individualmente según las normas y valores democráticos, al relacionarse con los demás y afrontar los conflictos	**5**	**5**	**3**	**4**	**4**	**3**	**4**	**3**	**5**	**4**	**2**	**3,82**	**0,98**
Cooperar y comprometerse en el trabajo científico y en las relaciones interpersonales	**3**	**3**	**2**	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,45**	**0,69**
Competencia en aprender a aprender	**4**	**4**	**4**	**4**	**2**	**4**	**4**	**4**	**4**	**4**	**2**	**3,64**	**0,81**
Iniciarse en el aprendizaje y ser capaz de continuarlo de manera autónoma (saber ser)	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**4,27**	**1,62**
Desenvolverse ante las incertidumbres: tratando de buscar respuestas, admitiendo diversas soluciones ante un mismo problema	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5,00**	**0,00**
Habilidad para organizar el tiempo de forma efectiva y perseverancia en el aprendizaje	**3**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,45**

Los datos más relevantes en cuanto a las competencias social y ciudadana y aprender a aprender son los siguientes:

Aunque los valores referenciales mínimos de la competencia (***VRC*$_1$**) son bajos, no todos los alumnos alcanzan el nivel medio en la cooperación y el compromiso en las relaciones interpersonales y el trabajo científico: Brais, Berta, Diana y Débora están en el nivel ***NC*$_1$**, por los conflictos actitudinales que protagonizaron. En lo que respecta a aprender a aprender, son dos los estudiantes que no alcanzan valores deseables: Carlos y Débora, que demostraron una baja autorregulación del aprendizaje y poca perseverancia incluso para asistir a clase. Al comparar los valores que indican la autonomía en el aprendizaje con la organización del tiempo y las tareas de estudio, las conclusiones que se extraen son claras, y consistentes con las interpretaciones que se han descrito en apartados anteriores: a pesar de que todos salvo Carlos y Débora han demostrado que son capaces de realizar un aprendizaje autónomo (como es de esperar, dada la edad que tienen estos alumnos), solamente Ana alcanza el nivel medio en constancia y perseverancia en el aprendizaje, mientras que los demás se quedan en valores aceptables por la mínima (con la excepción de Débora, ausente a la mitad de las actividades). Estos datos apuntan hacia los problemas actitudinales que se vienen describiendo a lo largo del capítulo: en general, los estudiantes de la muestra no reunían las características contextuales que pudieran favorecer su interés por los contenidos que se querían trabajar con ellos, y cumplían con las tareas propuestas con el mínimo esfuerzo posible para obtener una calificación positiva.

En síntesis, los resultados del análisis por competencias concuerdan con los del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, y aportan información interesante relacionada con las observaciones que se realizaron a lo largo de la intervención, en cuanto a las destrezas lingüísticas y de comunicación, los aspectos actitudinales y los estilos de aprendizaje.

III.4. Contraste de la *sHT*$_{1.1}$

Con el propósito de determinar los conocimientos iniciales de los alumnos, además de aplicar las pruebas que constituyen la batería de caracterización inicial de la muestra (***Capítulo IV***), se ha analizado el proceso de aprendizaje que se realizó durante la implementación de la primera unidad didáctica. Este seguimiento da información sobre cómo evolucionaron los conocimientos sobre los cuales se trabajaría en la fase de intervención, y permite indagar en los efectos que tuvo la adaptación a la metodología en la evolución del conocimiento.

Además, proporcionó a los investigadores suficientes claves para comprobar hasta qué punto los alumnos tenían ideas previas basadas en modelos alternativos de la energía, las transferencias de energía, el enlace y la reacción química. Gracias a esta información, no hubo necesidad de incluir en la batería de caracterización inicial ninguna prueba sobre los conocimientos iniciales de los estudiantes en Termodinámica Química.

Los resultados del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción demostraron que, inicialmente, los alumnos tenían escasos conocimientos sobre los fenómenos propuestos, y manifestaban dificultades para expresar y sistematizar sus observaciones. La falta de integración entre los conocimientos de los dominios macroscópico y microscópico (Johnstone *et al.*, 1982), y la carencia de conocimientos sobre los aspectos microscópicos se han revelado como obstáculos a la hora de dar significado a los conceptos y enunciados termodinámicos.

A lo largo de la implementación de la propuesta, los alumnos activaron esquemas de razonamiento y acción útiles en la descripción termodinámica de los sistemas químicos y de los procesos que en ellos tienen lugar; y avanzaron en la movilización de conocimientos científicos para la descripción e interpretación de situaciones problemáticas. Este hecho nos permite cuantificar la capacidad de la propuesta didáctica para promover cambios significativos en el conocimiento de los alumnos hacia relaciones más acordes con la ciencia escolar.

En cuanto al desarrollo de la competencia científica, para comprobar si a lo largo de la unidad didáctica *Termoquímica* se construyó un conocimiento adecuado de la ciencia escolar, se ha realizado un contraste estadístico entre los resultados que se expusieron para la competencia científica desarrollada por los alumnos (*Tabla 35*, pág. 830), y los resultados una vez que se eliminan los datos del primer ciclo de actividades de exploración-indagación-aplicación (Ollerenshaw y Ritchie, 1997); también se han suprimido los datos de *Fp15*, a la que solamente se presentó la mitad de la muestra. Así pues, se ha comparado el conjunto de datos de 10 actividades de exploración y aplicación (*Fp01*, *Fp03*, *Fp04*, *Fp05*, *Fp07*, *Fp08*, *Fp09*, *Fp12*, *Fp13* y *Fp14*), con el conjunto de datos de las 7 últimas actividades de exploración y aplicación en las que estuvo presente el conjunto de la muestra (*Fp05*, *Fp07*, *Fp08*, *Fp09*, *Fp12*, *Fp13* y *Fp14*). El *test* estadístico aplicado es la prueba de Kolmogorov-Smirnov para muestras independientes, con $\alpha = 0{,}10$. Se obtenido valores $D_{máx} = 0{,}55$ y $D_{crít} = 0{,}52$, por lo que se concluye que existen diferencias significativas entre el nivel de competencia científica que demostraron los alumnos en el *Bloque II* de *Termoquímica* y en el conjunto de la secuencia didáctica, de lo que se infiere que a lo largo de la fase previa se promovió un aprendizaje de los conocimientos deseables de la ciencia escolar.

Así pues, los enunciados operativos que se derivaron de la $sHT_{1.1}$ y se utilizan para ponerla a prueba, se confirman de la siguiente manera:

- Al comienzo de la unidad *Termoquímica*, los alumnos:
  - no describían adecuadamente los sistemas objeto de estudio a través de variables termodinámicas función de estado (ver *Fp01*, *Fp03*);
  - no establecían adecuadamente las transferencias energéticas por calor y trabajo que experimentan los sistemas (ver *Fp01*, *Fp03*, *Fp04*);

- no relacionaban adecuadamente las transferencias energéticas con los cambios en la energía del sistema, ni a nivel macroscópico ni microscópico (microscópico, no hasta *Fp14*);
- no ponían en juego el primer principio de la Termodinámica en relación con la conservación de la energía (no hasta *Fp04*);
- no relacionaban la magnitud entalpía con el calor transferido a presión constante ni con la variación de energía del sistema (hasta *Fp05* no se presentó el concepto, y la adquisición general del mismo tardó hasta *Fp08*);
- no utilicen los intercambios de energía para clasificar los procesos como exotérmicos o endotérmicos, en función de las variaciones de energía interna o de entalpía (el concepto se presenta en *Fp03*);
- no conocían los métodos calorimétricos (no hasta *Fp07*);
- no aplicaban las leyes de la Termoquímica para estudiar los procesos químicos desde el punto de vista energético (no hasta la actividad *Fp12*);
- no justificaban los cambios en la energía del sistema mediante razonamientos basados en los modelos microscópicos de la Química (éstos se introducen en *Fp14*, y eran bastante fragmentarios); y
- no tenían suficientes destrezas relacionadas con las técnicas y métodos matemáticos que se utilizan en Termoquímica: la selección y la interpretación de los datos termodinámicos tabulados y su manipulación algorítmica (hasta *Fp12*), y la representación de los aspectos energéticos de las reacciones químicas mediante ecuaciones termoquímicas (no hasta las actividades de calorimetría) y diagramas entálpicos (se introducen en *Fp05*, en la que se presentan muchas dificultades).

- La realización de las actividades de *Termoquímica* ayuda a los alumnos a mejorar significativamente sus conocimientos, en términos de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias científicas utilizadas.

Así pues, se verifica la subhipótesis ***sHT***$_{1.1}$, tal como se enunció en el ***Capítulo I*** (ver ***Volumen A***).

Al comienzo de la aplicación de la primera propuesta didáctica objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes son, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos. La aplicación de la primera propuesta didáctica favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento y de acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar los procesos termodinámicos de manera científica. Tras la aplicación de la primera propuesta en el aula, los estudiantes demuestran haber avanzado en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

IV. Valoración del conocimiento inicial de los estudiantes (caracterización inicial)

En este capítulo se procede al contraste de la *Subhipótesis de trabajo 1.2* ($sHT_{1.2}$) de la investigación. Para ello, se describen y analizan los conocimientos de los estudiantes inmediatamente antes de la implementación de la propuesta de enseñanza sobre Termodinámica Química. Los datos objeto de análisis proceden de las respuestas escritas del alumnado a una serie de pruebas que constituyen una batería de caracterización inicial de la muestra. Los resultados de este análisis ayudan a determinar las características del conocimiento inicial, porque revelan qué conocimiento utilizaron los alumnos en el momento en que se considera terminado el proceso de aprendizaje influido por el cambio metodológico (ver ***Volumen A***).

En el ***Capítulo IV*** se describen la toma, el tratamiento, la transformación y el análisis de los datos a partir de los cuales se han obtenido los resultados que han permitido contrastar la *Subhipótesis de trabajo 1.2* ($sHT_{1.2}$):

Planteamiento y fundamentación de la *sHT1.2* (pág. 840). Se plantea y justifica la segunda de las dos subhipótesis en las que se ha operativizado la primera hipótesis de trabajo de la investigación.

Aplicación y desarrollo de la propuesta didáctica sobre Termoquímica (fase previa *Fp*) (pág. 840). Se detallan las pruebas que constituyen la batería de caracterización inicial de la muestra.

Análisis y discusión de los resultados (pág. 846). Se describen y analizan los resultados obtenidos en la caracterización inicial de la muestra. El estudio de los resultados se ha realizado mediante dos tipos de análisis cualitativo, a cada uno de los cuales se dedica un apartado independiente; antes de detallar los análisis del aprendizaje, se incluyen los principales resultados del *Análisis item a item* (pág. 847) que sirvió para explorar la idoneidad de las pruebas y para determinar los esquemas de razonamiento y acción de los alumnos.

Análisis mediante esquemas de conocimiento (pág. 847). Se detalla el análisis de los esquemas de razonamiento y de los esquemas de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se incluyen ejemplos representativos de varios esquemas de razonamiento y acción.

Análisis mediante competencias (pág. 951). Un análisis de las competencias que demostraron los estudiantes al resolver las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas de la caracterización inicial. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas por los estudiantes en sus respuestas a las pruebas. Las respuestas se ilustran con producciones textuales de los alumnos.

Contraste de la *sHT1.2* (pág. 957). Se establecen las conclusiones derivadas del análisis discutido en el presente capítulo, análisis que ha permitido la verificación o refutación de la *Subhipótesis de trabajo 1.2* ($sHT_{1.2}$).

IV.1. Planteamiento y fundamentación de la $sHT_{1.2}$

Con el propósito de determinar los conocimientos iniciales del alumnado, se diseñó una batería de pruebas de caracterización inicial de la muestra, compuesta por cinco pruebas mediante las que se exploró hasta qué punto los alumnos habían construido, a lo largo de la fase previa a la intervención, ciertas concepciones y destrezas sobre las que se cimientan las que se trabajarían en la fase de intervención.

Los resultados del análisis de las respuestas que elaboraron los estudiantes para resolver las cuestiones planteadas en las pruebas iniciales, permiten determinar los conocimientos que tenía cada individuo inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta de enseñanza. En el ***Capítulo I*** (***Volumen A***) se formuló la *subhipótesis de trabajo 1.2 ($sHT_{1.2}$)*, la segunda subhipótesis en la que se operativizó la primera hipótesis de trabajo, dada la amplitud y la diferente condición de los resultados que permiten contrastarla.

Inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes siguen siendo, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Sin embargo, los alumnos activan esquemas de razonamiento y acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar científicamente los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se verifican progresos significativos en los esquemas y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación inicial.

La $sHT_{1.2}$ hace referencia a las condiciones iniciales del conocimiento de los estudiantes una vez se ha terminado el periodo de acomodación a la metodología ensayada, e inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta de enseñanza (sobre Termodinámica Química). Considerando que la producción oral y escrita del alumnado revela la incorporación de las relaciones establecidas a lo largo de la intervención y, por tanto, pone de manifiesto la implicación de cada individuo en la evolución de su propio conocimiento, para contrastar la $sHT_{1.2}$ se determinó el conocimiento que demostraron los alumnos en las manifestaciones escritas con las que respondieron las cuestiones planteadas en las cinco pruebas que constituyen la

batería de caracterización inicial de la muestra. La determinación del conocimiento inicial se realiza mediante los dos métodos de análisis cualitativo cuyos fundamentos se describen en el ***Volumen A***: los esquemas de razonamiento y de acción, y las competencias.

Los enunciados operativos que se derivan de la $sHT_{1.2}$ y se utilizan para ponerla a prueba, están relacionados con los que se han aplicado en el contraste de la $sHT_{1.1}$:

- Inmediatamente antes de comenzar la unidad didáctica *Termodinámica Química*, se espera que los alumnos:
  - describan adecuadamente los sistemas objeto de estudio a través de variables termodinámicas que sean función de estado del mismo;
  - establezcan adecuadamente las transferencias energéticas por calor y trabajo que experimentan los sistemas en los procesos físicos y químicos;
  - relacionen adecuadamente las transferencias energéticas con los cambios en la energía del sistema, a nivel macroscópico y microscópico;
  - pongan en juego el primer principio de la Termodinámica en relación con la conservación de la energía;
  - relacionen la magnitud entalpía con el calor transferido a presión constante ni con la variación de energía del sistema;
  - utilicen los intercambios de energía para clasificar los procesos como exotérmicos o endotérmicos, en función de las variaciones de energía interna o de entalpía;
  - apliquen las leyes de la Termoquímica y sus implicaciones para estudiar los procesos químicos desde el punto de vista energético;
  - justifiquen los cambios en la energía del sistema mediante razonamientos fundamentados en los modelos microscópicos de la Química;
  - tengan suficientes destrezas relacionadas con las técnicas y métodos matemáticos que se utilizan en Termoquímica: la selección y la interpretación de los datos termodinámicos tabulados y su manipulación algorítmica, y la representación de los aspectos energéticos de las reacciones químicas (ecuaciones termoquímicas, los diagramas entálpicos).

Antes de describir e interpretar en profundidad los resultados correspondientes a la caracterización inicial de la muestra, en el siguiente apartado (página siguiente) se detallan las pautas que se siguieron en la aplicación y desarrollo de la primera propuesta en el aula, con dos finalidades: explorar las características de las pruebas utilizadas en la evaluación del aprendizaje realizado, y repasar las principales incidencias que tuvieron lugar en las sesiones de clase en las

que se realizó la caracterización inicial de la muestra.

IV.2. Aplicación y desarrollo de la batería inicial de pruebas (caracterización inicial C_i)

En este apartado se exponen las observaciones más destacadas sobre la implementación de batería de caracterización inicial de la muestra, incluyendo la repercusión de los aspectos metodológicos en la aplicación de las pruebas y las principales incidencias que se produjeron en el aula.

La caracterización inicial de la muestra tuvo lugar poco antes de mediados de marzo de 2009, inmediatamente después del examen tradicional de la asignatura, en el que se calificó el desempeño de los alumnos en la resolución de ejercicios de Química Orgánica y de Termoquímica (ver ***Volumen A***) similares a las preguntas de Selectividad. El examen de evaluación, a imitación de los que se venían realizando habitualmente, respondía a la finalización de la primera unidad didáctica ensayada (cuyos resultados se han descrito en el ***Capítulo III***), y la caracterización inicial se aplicó también entonces, por considerar que se había minimizado el impacto del cambio metodológico sobre el aprendizaje.

Desde antes de empezar la secuencia sobre Termoquímica, los alumnos ya estaban prevenidos de la fecha aproximada y las características del examen tradicional, porque todos los profesores de Ciencias del centro realizaban controles escritos al final de cada unidad didáctica. Por lo tanto, a la hora de programar las baterías de caracterización para valorar los conocimientos en diferentes momentos de aprendizaje, se tuvo en cuenta dos aspectos axiológicos importantes:

En primer lugar, era de esperar que se realizara un examen tradicional, sin el cual quizá se generara malestar en el grupo de clase: los alumnos estaban acosumbrados a los métodos de evaluación/calificación de la enseñanza tradicional, y podría causarles rechazo la aplicación de una metodología tan innovadora como para eliminar las posibilidades de obtener una calificación positiva solamente respondiendo a preguntas cerradas y ejercicios mecánicos cuya resolución resultara asequible habiendo estudiado de memoria los contenidos prescritos por el profesor. Ya se habían hecho evidentes algunas manifestaciones de disgusto por parte de Brais, Berta y Débora (ésta última ausente en las últimas sesiones de clase), quienes consideraban que las tareas propuestas en las actividades de la secuencia didáctica ensayada les exigían un esfuerzo excesivo del que, además, no podían huir sin que su renuncia no fuera evaluada negativamente. A la vista de los problemas actitudinales que se habían presentado, y de la seguridad que infundía a los estudiantes de este grupo una calificación que estuviera basada, en parte, en el rendimiento demostrado en un examen tradicional (que por otra parte servía de *adiestramiento* para las PAAU), se decidió no cancelar la realización del mismo.

Al mismo tiempo, desde el punto de vista de la investigación se pretendía que los estudiantes fueran conscientes de que las pruebas de caracterización de la muestra se utilizarían para la evaluación de sus ideas en momentos clave; y se deseaba lograr un equilibrio emocional en el que no se agobiaran ante la idea de enfrentarse a varios *exámenes* seguidos (lo que podría desvirtuar nuestro empeño por hacerles percibir la importancia de su esfuerzo diario), pero se esforzaran por responder con seriedad a las pruebas. Para lograr este objetivo, recomendamos al profesor que presentara las baterías de caracterización como pequeños boletines de actividades complementarias a las realizadas en clase, que servirían para refinar la evaluación académica, basada en el trabajo de aula.

Con la finalidad de reforzar la percepción de que las baterías de pruebas eran simulacros de control escrito que no estaban sometidos a una observación tan rigurosa como un examen de evaluación, el desarrollo de las caracterizaciones no se grabó en audio y vídeo. Tanto el examen tradicional como las pruebas de caracterización se realizaron en el laboratorio de Química, y los alumnos se sentaron en las mesas en el orden en el que disponían en las sesiones de clase.

La implementación de las pruebas de caracterización inicial de la muestra ocupó casi dos sesiones del horario lectivo de la materia de Química, o más exactamente, una sesión completa de 50 minutos (en viernes) y mitad de otra (a la semana siguiente, el martes por la tarde), por los motivos que se indican en la página siguiente. El procedimiento para recabar los datos consistió en dos tipos de acciones: en primer lugar, la recogida y revisión de los materiales escritos que produjeron por los alumnos como respuesta a las cinco pruebas de la batería que se describen en el apartado siguiente, titulado *Aplicación y desarrollo de la batería inicial de pruebas (caracterización inicial **Ci**)* (pág. 842), y, en segundo lugar, la toma de notas de campo por parte de la investigadora, que estuvo presente en todo momento como observadora independiente.

Ya se ha indicado que, al igual que en las demás pruebas de caracterización, no se prohibió expresamente a los alumnos que intercambiaran impresiones, aunque sí se les pidió que respondieran a las cuestiones de manera individual. Rodrigo se prestó a solucionar posibles dudas sobre los enunciados de las preguntas planteadas (aunque no hubo incidencias importantes a este respecto), y la investigadora tomó nota de las interacciones que se produjeron con el profesor y entre los estudiantes.

A la hora de describir cómo se desarrollaron las pruebas en el aula, no se deben omitir las implicaciones que tuvieron las calificaciones del examen tradicional que se acababa de realizar el día anterior y que Rodrigo, el profesor, había corregido ya. Estas calificaciones (ver ***Volumen A***) influyeron claramente sobre los resultados que se obtendrían en la caracterización inicial de la muestra y, sobre todo, en el

posterior desarrollo de la fase de intervención, en la que se implementó la unidad didáctica sobre Termodinámica Química:

Pocos minutos antes de terminar la sesión del viernes, se observó que los alumnos tenían muchas dudas sobre la segunda prueba de la batería de caracterización inicial, aunque habían trabajado con los sistemas eléctricos en otras materias de Ciencias (como en *Tecnología* y *Física y Química* de ESO). Además, Adela y Clara habían llegado 10 minutos tarde a clase. Viendo estas dificultades, el profesor y la investigadora decidieron conceder a los alumnos un fin de semana para completar sus respuestas a las pruebas, e incluso se les permitiría llevarse consigo los guiones de trabajo, previa revisión de las manifestaciones escritas realizadas aquel día, con la finalidad de contrastar qué ideas de la ciencia escolar podían utilizar de manera autónoma, y para cuáles necesitaban ayuda. Así tendrían tiempo suficiente para consultar libremente toda la información de la que dispusieran en sus casas, en las bibliotecas, por Internet… Como los alumnos querían conocer cuanto antes las calificaciones del examen tradicional, Rodrigo se las facilitó, mientras la investigadora revisaba las manifestaciones escritas y realizaba un registro fotográfico de las mismas. Las reacciones de los alumnos calificados negativamente no se hicieron esperar (ver ***Volumen A***): Berta se exasperó y declaró que si no aprobaba los exámenes no le "cundía" seguir esforzándose en clase de Química, Brais secundaba el enfado de Berta (aunque marcando cierta distancia con respecto a ella), Clara demostró que el suspenso la desanimaba, e Carlos se encogió de hombros, entre indiferente y despechado. Estas actitudes negativas hacia el aprendizaje de la asignatura y el trabajo realizado en el aula se traducirían en un descenso de la asistencia de Berta y Diana; Carlos continuaría llegando tarde a clase, como había hecho en los cinco cursos anteriores, y Brais comenzó a negarse abiertamente a realizar las actividades.

Al día siguiente, ni Carlos ni Berta asistieron, y en lo sucesivo se negaron a entregar los guiones de trabajo correspondientes a las puebas de caracterización inicial, a pesar de que Rodrigo se los requirió en varias ocasiones. Este claro rechazo de Carlos y Berta a participar en la metodología nos ha llevado a eliminar sus datos de caracterización inicial del análisis del aprendizaje, como si no hubieran asistido a clase; porque la intención de estos dos alumnos era precisamente privar de estos datos a los investigadores, dando a entender que esperaban la mínima calificación posible en el *control escrito* previo a la intervención.

El diseño de la batería de caracterización inicial tuvo en cuenta la necesidad de presentar distintos contextos y situaciones para que los alumnos pongan de manifiesto sus esquemas de razonamiento y acción. Dado que la resolución eficaz de ejercicios o problemas sencillos de naturaleza algorítmica no tiene por qué indicar una comprensión de las ideas científicas (Nuremberg y Pickering, 1987; Nakhleh y Mitchell, 1993), no se puede considerar que la capacidad de responder

este tipo de cuestiones esté vinculada al conocimiento profundo del tema objeto de estudio, y menos en una disciplina tan compleja como la Termodinámica de los procesos químicos, como se ha puesto de manifiesto en el ámbito del Equilibrio Químico (Rocha, 2008). Así pues, se diseñaron cinco pruebas de manera que incluyeran tareas de los siguientes perfiles:

Dos de las cuestiones (*Ci01* y *Ci02*) son de tipo descriptivo, y las otras tres, interpretativas. En *Ci01* y *Ci02* se pide al alumnado que describan sistemas y procesos de manera cualitativa, sin realizar ningún tipo de cálculo matemático ni representación gráfica. Se ha regulado la dificultad de ambas pruebas de manera que la primera (*Ci01*) tenga relación con una actividad familiar para el alumnado y la segunda (*Ci02*) plantee más dificultad, con la finalidad de explorar qué diferencias se ecuentran en la transferencia de conocimiento a sistemas y procesos menos conocidos. Así, *Ci01* parte del planteamiento de *Fp03* y lo extiende a la posibilidad de utilizar una nueva reacción química para identificar el gas desprendido en la reacción de oxidación del zinc por parte del ácido clorhídrico. La razón de que la primera prueba de caracterización inicial tenga continuidad con una actividad de la fase previa obedece al escaso conocimiento inicial que demostraron tener los estudiantes sobre las reacciones químicas. Antes de la fase experimental de la investigación, se habían diseñado diez posibles pruebas de caracterización inicial, para poder elegir las más adecuadas a los conocimientos iniciales del alumnado. Llegado el momento de aplicar las pruebas, se tuvieron en cuenta las impresiones de Rodrigo sobre la dificultad que ofrecerían varias de ellas a los estudiantes, y los resultados preliminares del aprendizaje realizado a lo largo de *Termoquímica*. En consecuencia, se atendió a la necesidad de seleccionar un proceso químico sobre el que los alumnos ya hubieran trabajado y en un momento en el que hubiese transcurrido un cierto tiempo como para que la memoria a corto plazo no tuviera efectos inmediatos sobre las respuestas, pero que tampoco se hubiera producido un olvido que les impidiese reconocer la reacción química planteada. La segunda prueba tenía que ofrecer un vivo contraste con la primera, de manera que presentara un sistema termodinámico menos sencillo y un proceso químico más novedoso para los estudiantes. De común acuerdo con el profesor, se recurrió a una reacción redox cuyos aspectos energéticos se ponen de manifiesto fácilmente, mediante un sencillo montaje de laboratorio que sirve para detectar el paso de corriente eléctrica. En varias materias de Ciencias, los alumnos ya habían estudiado el tema de electricidad a lo largo de los cursos anteriores, y los contenidos con los que se trabaja en *Ci02* no exceden lo esperable para la materia de *Física y Química* de 1º de Bachillerato (XUGA, 2008). Sin embargo, se preveía que se presentaran dificultades, porque era posible que el aprendizaje del Electromagnetismo fuera en su día de tipo repetitivo, memorístico, y que los contenidos conceptuales y procedimentales no se hubieran integrado como conocimiento útil en las estructuras cognitivas de todos los integrantes de la muestra. Los resultados correspondientes a la prueba *Ci02*

confirman que los conocimientos de los estudiantes en cuanto a los fenómenos eléctricos eran claramente deficientes; a pesar de ello, la transferencia de las ideas termodinámicas para la interpretación del proceso químico redox es aceptable, si se tiene en cuenta de qué situación inicial se partía.

En cuanto a las pruebas más interpretativas, se escogió una *Ci03* que permitiera una transición hacia las destrezas y estrategias científicas relacionadas con el tratamiento matemático de los datos termoquímicos, sin perder de vista la toma de decisiones sobre la base de criterios cualitativos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, pág. 858). El proceso químico planteado no debería ofrecer dificultades en 2º de Bachillerato, y los cálculos que se piden son del mismo tipo que se plantearon en la tercera parte de las actividades de la fase previa (*Fp08*, *Fp09*, *Fp12*, *Fp13* y *Fp14*). Con *Ci04*, se indaga en las destrezas y estrategias relacionadas con los diagramas entálpicos. *Ci05* se seleccionó por razones similares a *Ci02*: plantea el mismo tipo de tareas que las dos pruebas anteriores, pero con un grado de dificultad superior a *Ci03* y *Ci04*; y no por las acciones científicas que se plantean, sino por los conocimientos conceptuales que se exigen para construir el ciclo de Born-Haber: los alumnos deben conocer los procesos de disociación de una molécula covalente, sublimación de un sólido e ionización a partir de átomos neutros (formación de cationes y aniones). Se trata de procesos químicos elementales que se suponen ya conocidos en 2º de Bachillerato.

Con la elección de estas pruebas de caracterización inicial, se renunció a indagar en los conocimientos de los alumnos en Termodinámica Química, porque los resultados del aprendizaje que se produjo a lo largo de la unidad didáctica sobre *Termoquímica* (ver ***Capítulo III***) habían proporcionado a los investigadores suficientes claves para detectar las ideas previas sobre la energía, las transferencias de energía, el enlace químico y la reacción química. Dado que los estudiantes de la muestra no habían estudiado Termodinámica Química en los cursos previos a 2º de Bachillerato, era de esperar que sus conocimientos sobre esta materia fueran intuitivos y bastante inconexos, y los resultados preliminares del seguimiento de la fase previa así lo confirmaron (ver ***Capítulo III***).

IV.3. Análisis y discusión de los resultados

La relación entre los conocimientos iniciales del alumnado y los conocimientos deseables de la ciencia escolar se determinó mediante una batería de caracterización inicial de la muestra constituida por una serie de pruebas sobre el tema objeto de estudio: la Termoquímica.

En este apartado se describen y analizan los resultados que se obtuvieron en la caracterización inicial de la muestra, al aplicar dos tipos de análisis cualitativo, a cada uno de los cuales se dedica un apartado independiente: un *Análisis mediante esquemas de conocimiento* (pág. 847) y un *Análisis mediante competencias* (pág. 951). El

primero consistió en la determinación de los esquemas de conocimiento (razonamiento y acción) que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales en las cinco pruebas de caracterización inicial de la muestra, y el segundo es un análisis de las competencias que demostraron los alumnos al resolver las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas. Tanto los esquemas de conocimiento como las competencias se reconstruyeron a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas por los estudiantes en sus respuestas, y estos razonamientos y estrategias se extrajeron directamente de las manifestaciones escritas escritas volcaron en un análisis previo que hemos denominado *Análisis item a item* (pág. 847). En él, se realiza una breve descripción de los perfiles de respuesta que dieron los alumnos a los distintos *items* identificables en las pruebas y se analizan las elecciones de hipótesis realizadas por los alumnos y los principales razonamientos justificativos en los que éstas se fundamentan (análisis horizontal de los datos), y a partir de ellas se establecen categorías de razonamiento para las respuestas atendiendo a la coincidencia de las relaciones que subyacen en los argumentos utilizados en las descripciones e interpretaciones (análisis vertical). Cada categoría de razonamiento se ilustra con algunos ejemplos representativos de respuestas escritas elaboradas por el alumnado.

IV.3.1. Análisis *item* a *item*

A continuación se describen los razonamientos justificativos y las estrategias de acción que utilizaron los alumnos en sus respuestas a todas y cada una de las pruebas de caracterización inicial, y se describen y analizan las manifestaciones escritas más representativas de la muestra. Los enunciados de las pruebas se representan en el tipo de letra `Courier New`, y las manifestaciones escritas se transcriben en Comic Sans.

Vaciadas las respuestas escritas de los estudiantes y organizadas en las categorías que se describen en el ***Volumen A***, los resultados del análisis *item* a *item* para las pruebas de caracterización inicial de la muestra son los siguientes:

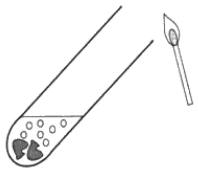
IV.3.1.1. Descripción de resultados de la prueba *Ci01* de caracterización inicial

Prueba *Ci01*: nueva descripción termodinámica de un sistema químico

Vas a comprobar cómo en un tubo de ensayo reaccionan o ácido clorhídrico diluido, $HCl_{(aq)}$, y granalla de cinc, $Zn_{(s)}$.

Para identificar el gas desprendido en la reacción, puedes acercar la llama de una cerilla a la boca del tubo de ensayo:

$H_{2\ (g)} + ½\ O_{2\ (g)} \rightarrow H_2O_{\ (g)}$



Ci01[1]

A. Observa y describe lo que sucede.

.....

B. ¿Cómo lo interpretas, desde el punto de vista termodinámico?

.....

Los resultados del *item Ci01[1]* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Adela	Diana	Clara	Darío
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS								
Relaciones sobre el fenómeno								
Reconocen que el fenómeno observado implica dos reacciones químicas	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico								
Describen el proceso termodinámico, constituido por las dos reacciones observadas		✓			✓	✓	✓	✓
Utilizan las variables termodinámicas en la descripción del proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Describen las transferencias de energía implicadas en el proceso termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de calor	✓	✗	✓	✗	✓		✓	
RELACIONES DESCRIPTIVAS								
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS								
Relaciones macroscópicas								
Relaciones sobre el sistema y el entorno								
Identifican solamente un sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican como sistema termodinámico el sistema químico, constituido por los reactivos y productos de las reacciones 1 y 2		✓					✓	✓
Identifican como sistema termodinámico el contenido del tubo	✓		✓	✓	✓	✓		
Identifican como sistema termodinámico al tubo con HCl	✗							
Identifican dos sistemas termodinámicos diferentes: un sistema reaccionante para cada reacción	✓	✓					✓	✓
Identifican un entorno termodinámico (medio exterior al sistema)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden al tubo de ensayo								
Aluden a un medio exterior	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a la llama		✓	✓		✓		✓	✓
Consideran que la reacción 2 se produce en la pared entre el sistema y el medio exterior	✓	✓	✓				✓	✓
Describen la composición química del sistema reaccionante en su estado inicial (reactivos de la reacción 1)	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Consideran que el HCl es un líquido						✗		
Describen la composición química del sistema reaccionante en un estado intermedio (productos de la reacción 1, antes de producirse la reacción 2)		✓					✓	✓
Mencionan únicamente el H_2		✓					✓	✓
Mencionan la presencia de O_2	✓						✓	✓
Describen la composición química del sistema reaccionante en su estado final (productos de la reacción 2)		✓					✓	

Describen la composición química del sistema reaccionante en su estado final (productos de la reacción 1)			✖	✓	✖			
Consideran que, como consecuencia de la reacción 1, se produce un gas compuesto de H_2O			✖					
Mencionan únicamente el H_2				✖				
Describen la composición en fases del sistema reaccionante en su estado inicial (reactivos de la reacción 1)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mencionan únicamente el $Zn_{(s)}$			✓	✓				✓
Describen la composición en fases del sistema reaccionante en un estado intermedio (productos de la reacción 1, antes de producirse la reacción 2)	✓	✓					✓	✓
Mencionan únicamente el $H_{2\,(g)}$		✓					✓	✓
Mencionan la presencia de $O_{2\,(g)}$	✓	✓					✓	✓
Describen la composición en fases del sistema reaccionante en su estado final (productos de la reacción 2)	✓	✓					✓	
Describen la composición en fases del sistema reaccionante en su estado final (productos de la reacción 1)			✖	✓	✖			
Explicitan una clasificación del sistema según el número de fases presentes en alguno de los estados termodinámicos por los que pasa el sistema a lo largo del proceso						✖		
Consideran que los sistemas heterogéneos se caracterizan por la presencia de una sola fase						✖		
Manifiestan algún tipo de confusión entre el sistema termodinámico y el proceso que éste sufre					✖			
Clasifican el sistema como endotérmico, puesto que de él se libera energía					✖			
Relaciones sobre el fenómeno								
Recogen observaciones sobre el *burbujeo* producido	✖	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓
Consideran que el burbujeo se debe al desprendimiento de un gas	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Identifican el gas responsable de burbujeo como un producto de la reacción		✓	✖	✓	✓		✓	✓
Identifican el gas responsable de burbujeo como hidrógeno molecular		✓		✓			✓	✓
Establecen un paralelismo entre la especie de gas desprendido y el vapor de agua			✖					
Consideran que el burbujeo se debe al producto que está en el tubo de ensayo	✖							
Consideran que el burbujeo se debe a movimientoso o corrientes de líquido en el seno de la fase líquida, o a una manifestación del comportamiento del sistema en condiciones de altas temperaturas						✖		
Consideran que los movimientos en el líquido se deben al aumento de temperatura del sistema						✖		
Consideran que el burbujeo se deben a la disolución del $Zn_{(s)}$					✖	✖		
Consideran que, además del fenómeno de burbujeo, se produce la liberación de hidrógeno gaseoso						✖		
La liberación de hidrógeno gaseoso se debe al proceso de reacción		✓				✖		
La liberación de hidrógeno gaseoso se produce mientras hay Zn en estado sólido					✖			
Recogen observaciones sobre el aumento del temperatura del sistema		✖		✓	✓	✓	✓	
El aumento de temperatura se debe al proceso de reacción					✓	✓	✓	
Consideran que el tubo se calienta		✖					✖	
Consideran que el tubo está caliente		✖						
Consideran que el sistema libera energía	✓	✓		✓			✓	
La liberación de energía/calor se debe a la reacción 1							✓	
La liberación de energía/calor se debe a la explosión (reacción 2)	✓							
Recogen observaciones sobre la disolución del $Zn_{(s)}$	✓	✓			✓	✓	✖	
Relacionan la disolución del $Zn_{(s)}$ con el proceso de reacción química	✓	✓			✓		✓	
Consideran que la disolución uno de los procesos que tienen lugar durante la reacción	✓	✓			✖	✓		
Consideran que el $Zn_{(s)}$ se disuelve porque reacciona	✓	✓					✓	
Consideran que ya no se distinguen dos sustancias químicas en la reacción						✖		
Consideran que el $Zn_{(s)}$ desaparece debido a que reacciona		✖						

Consideran que el Zn $_{(s)}$ se deshace					✖			
Consideran que el Zn $_{(s)}$ cambia de estado: Zn $_{(s)}$ → Zn $_{(l)}$					✖			
Consideran que el Zn $_{(s)}$ se diluye							✖	
Recogen observaciones sobre la explosión observada	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Relacionan la explosión con el carácter inflamable del $H_{2\,(g)}$				✓				
Relacionan la explosión con la presencia de la llama	✓				✖		✓	✓
La explosión se produce cuando se acerca la llama	✓				✓		✓	✓
La explosión se debe a la interacción entre el hidrógeno liberado de la reacción 1 y el oxígeno presente en la atmósfera, ante la presencia (necesaria) de la llama							✓	✓
La explosión se debe a una reacción del sistema ante la presencia de la llama					✖			
Relacionan la explosión con la reacción química 2	✓	✓	✖				✓	✓
Relacionan la explosión con la combustión de un producto de la reacción 1	✓	✓	✖				✓	✓
Identifican el producto de la reacción 1 que se combustiona: hidrógeno gaseoso		✓					✓	✓
Identifican el producto de la reacción 1 que se combustiona: agua gaseosa			✖					✓
Explicitan que los procesos de disolución y/o reacción necesitan del contacto entre los reactivos	✓	✓			✓		✓	✓
Simplemente describen la adición de un reactivo sobre el otro (sin necesario contacto entre las partículas)	✓		✓		✓	✓	✓	
Identifican el gas producido en la reacción 1 mediante la "prueba de la llama"			✖					
E gas producido en la reacción 1 es vapor de agua, que explosiona en presencia de la llama			✖					
No recurren a la "prueba de la llama" para identificar al gas producido en la reacción 1	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Justifican el hecho de que en el sistema tenga lugar el proceso de reacción química								
Justifican la reacción 2 basándose en el carácter inflamable del $H_{2\,(g)}$				✓				
Relaciones sobre las variables termodinámicas								
Reconocen la variable temperatura como propiedad del sistema termodinámico					✓	✓	✓	
Reconocen la variable presión como propiedad del sistema termodinámico		✓					✓	✓
Describen algún valor concreto de la presión del sistema		✓						
Describen el valor de la presión del entorno		✓						
Justifican alguno de los valores de presión que describen		✓						
El aumento de presión del sistema se debe a que son iguales la presión en el exterior y en el interior del sistema		✓						
Reconocen la variable volumen como propiedad del sistema termodinámico						✓		✓
Reconocen la variable densidad como propiedad del sistema termodinámico						✓		
Reconocen la variable cantidad de materia como propiedad del sistema termodinámico						✓	✓	✓
Utilizan el concepto de masa							✓	✓
Utilizan el concepto de mol						✓		
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen la variable composición en fases como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mencionan variables termodinámicas, pero sin relacionarlas con el proceso termodinámico						✖	✖	✖
Mencionan la presión							✖	✖
Mencionan el volumen						✖		✖
Mencionan la masa							✖	✖
Mencionan el número de moles						✖		
Mencionan la densidad						✖		

Relaciones sobre los estados del sistema								
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos de la reacción 1)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican el estado final del sistema (productos de la reacción 1)			✗	✗	✗	✗		
Identifican el estado final del sistema (productos de la reacción 2)	✓	✓					✓	✓
Explicitan el concepto de estado de agregación					✗			
Describen algún cambio en el estado del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Describen el cambio en el estado del sistema durante la reacción química entre el Zn y el HCl	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Justifican algunos cambios del sistema basándose en las reacciones químicas que tienen lugar	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗
Justifican el burbujeo basándose en la reacción química entre el Zn y el HCl	✓	✓	✗	✓	✓		✓	✓
Justifican el aumento de temperatura del sistema basándose en la reacción química entre el Zn y el HCl					✓	✓	✓	
Justifican la disolución del Zn basándose en la reacción química entre el Zn y el HCl	✓	✗			✗	✓	✗	
Justifican la liberación de energía al entorno basándose en la reacción química entre el Zn y el HCl	✓	✓		✗	✓		✓	✓
Justifican la liberación de energía al entorno basándose en la reacción química entre el H_2 y el O_2	✓							✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico								
Identifican el proceso de reacción química entre el HCl y el Zn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Describen el tipo de reacción química que tiene lugar entre el Zn y el HCl (redox)								
Identifican el proceso de reacción química entre el H_2 y el O_2	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Describen el tipo de reacción química que tiene lugar entre el H_2 y el O_2 (combustión)	✓	✓		✓			✓	✓
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que sobre el sistema químico se suceden dos reacciones químicas, la segunda de las cuales tiene por reactivo un producto de la primera reacción		✓					✓	✓
Describen los procesos propuestos atendiendo a la variable termodinámica que permanece constante (la presión *p*)		✓						✓
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican el estado final del sistema (productos)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Recogen algún tipo de observación característica del proceso	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Recogen observaciones sobre el *burbujeo* producido	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Recogen observaciones sobre el aumento del temperatura del sistema		✗		✓	✓	✓	✓	
Recogen observaciones sobre la disolución del Zn $_{(s)}$	✓	✓			✓	✓	✗	
Recogen observaciones sobre la explosión observada	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que se producen variaciones en la temperatura del sistema durante el proceso observado					✓	✓		
Relacionan el proceso de reacción química con el aumento de temperatura del sistema durante el proceso					✓	✓		
Consideran que no se producen variaciones en la presión del sistema durante el proceso observado		✓						✓
Explican el hecho de que el valor de la presión del sistema se mantenga constante, basándose en que la presión del sistema y la del entorno son iguales		✓						
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema								
Manifiestan que existen diferencias de temperatura entre el sistema y el entorno					✓	✓	✓	
Aluden a la acción de calentar(se) el tubo							✗	
Aluden al hecho de que el tubo esté caliente		✗			✗			
Hacen referencia a la clasificación del sistema en función de sus interacciones con el entorno (sistema abierto)	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

Hacen referencia explícita a las transferencias de materia sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen el sentido neto de las transferencias de materia sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen el sentido neto de las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Se libera energía desde el sistema hacia el entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
La energía se libera en forma de calor		✗		✗				✗
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno con la diferencia de temperatura sistema – entorno		✗			✓	✓	✓	
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Explican sus observaciones sobre las variaciones de temperatura del sistema como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema		✗			✓	✓	✓	
Explican sus observaciones sobre las variaciones de temperatura del sistema como resultado de la reacción química		✗			✓	✓	✓	
Comparan la presión dentro del recipiente y la presión exterior		✓						✓
Aluden a diferencias entre la presión del sistema y la presión del entorno		✓						✓
La presión en el interior del recipiente cerrado, bajo el chorro de agua fría, es igual que en el exterior del recipiente		✓						✓
Consideran que el sistema libera materia al entorno (hidrógeno, de la reacción 1)		✓		✓			✓	✓
Consideran que el sistema libera materia al entorno (vapor de agua, de la reacción 1)			✗					
Consideran que el sistema recibe materia del entorno (oxígeno)	✓	✓					✓	✓
Realizan un balance de las transferencias (netas) de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Reconocen el sentido de cada una de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que la reacción redox libera energía	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Relacionan la energía liberada en la reacción redox con el proceso de calor	✓	✗	✓	✗	✓		✓	✓
Consideran que la reacción de combustión libera energía	✓		✓					
Relacionan la energía liberada en la reacción de combustión con el proceso de calor	✓		✓					
Identifican el calor como un proceso de transferencia de energía	✓						✓	✓
Identifican el calor como una forma de energía		✗		✗				
Relacionan la realización del calor sobre el entorno con la transferencia de energía desde el sistema hacia el entorno	✓	✗		✗			✓	✓
Consideran una *equivalencia directa* entre energía y calor, en el sentido de que una determinada cantidad de energía sólo puede transferirse (proceso) o movilizarse (forma de energía) por una cantidad de calor *igual o equivalente*	✓	✗		✗			✓	✓
Clasifican la reacción entre el Zn y el HCl como exotérmica / endotérmica en función del sentido global de las transferencias de energía sistema – entorno					✗		✓	✓
El sistema reaccionante (Zn y HCl) es endotérmico, puesto que libera energía					✗			
Relaciones microscópicas								
Relaciones sobre el fenómeno (físico y/o químico)								
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓	✓	✓	✓				
Apelan al concepto de disolución	✓	✓			✓	✓	✗	
Apelan al concepto de combustión	✓	✓		✓			✓	✓
Apelan al concepto de reactivo limitante						✓	✓	
Describen químicamente alguno de los tipos de reacciones químicas que tienen lugar en el sistema	✓	✓		✓	✓	✓	✗	✓
Apelan al concepto de mol	✗					✓		
Relacionan la reacción química con sus observaciones sobre los cambios producidos en el sistema durante el proceso termodinámico	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Relacionan la reacción química entre el Zn y el HCl con el burbujeo observado		✓	✖	✓	✓		✓	✓
Relacionan la reacción química entre el Zn y el HCl con el aumento de temperatura del sistema					✓	✓	✓	
Relacionan la reacción química entre el Zn y el HCl con la disolución del $Zn_{(s)}$	✓	✓			✓		✓	
Relacionan la reacción química entre el H_2 y el O_2 con la explosión observada	✓	✓	✖				✓	✓

El desempeño en esta prueba puede considerarse en general aceptable, porque los ocho alumnos identificaron las reacciones químicas objeto de estudio, y cinco de ellos llegaron a describirlas. Pero se encontraron dificultades que tienen que ver con la determinación de la composición química del sistema (Brais considera que el gas desprendido en la reacción de Zn y HCl es ¡agua!) y con la conceptualización de la reacción de disolución, que se puede considerar una "desaparición" del Zn (para Adela, éste se "deshace" y pasa "de sólido a líquido"):

[Brais, Ci01(1)]: Ao botar a granalla ~~e o zinc~~ de zinc e HCl empeza a burbullear e despréndese un gas, o H_2O e isto sábese porque ao achegar a chama dun misto á boca do tubo de ensaio prodúcese unha pequena explosión (…)

[Alfonso, Ci01(1)]: O HCl e o Zn reaccionan ó mesturarse e desaparece o Zn. Despois de esperar a que se produza a reacción observase que o tubo está quente. Ó achegar a chama prodúcese unha combustión en contacto co hidróxeno desprendido. (…)

Se describen los intercambios de energía y materia con el entorno; consideran que el sistema es abierto, porque libera $H_{2\,(g)}$ a la atmósfera. Para Benito y Darío, la materia se intercambia "en forma de hidrógeno":

[Benito, Ci01(1)]: É un sistema aberto, xa que a reacción intercambia materia en forma de hidróxeno co entorno, e intercambia enerxía en forma de calor (…)

Las ideas de la ciencia escolar en cuanto a las transferencias de energía también están presentes:

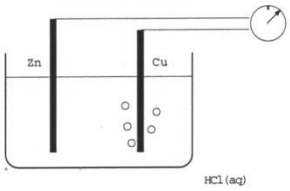
[Ana, Ci01(1)]: (…) Cando achegamos unha chama á boca do tubo de ensaio prodúcese unha combustión e libérase enerxía por un proceso de calor

Las descripciones elaboradas por los alumnos en sus respuestas a esta prueba de caracterización inicial se parecen, en cuanto a perfil y tipo de relaciones activadas, a las que generaron durante la fase previa para responder a las cuestiones de las actividades *Fp01* y *Fp03*.

IV.3.1.2. Descripción de resultados de la prueba *Ci02* de caracterización inicial

Prueba *Ci02*: ¿cómo "funciona" un sistema electroquímico?

En una cuba electrolítica, sumerge dos electrodos, uno de Zn $_{(s)}$ y otro de Cu $_{(s)}$, en una disolución de HCl $_{(aq)}$. Como indica la figura, conéctalos a un galvanómetro, que detecta el paso de la corriente eléctrica.



Ci$_{02}$[1]

A. Observa y describe lo que ocurre en la cuba electrolítica. ¿Qué sucede en la cuba si retiramos el electrodo de Zn $_{(s)}$ de la disolución? *¿Y al volverlo a introducir en la disolución?*

.....

B. ¿A qué crees que se deben los cambios que observas?

.....

C. ¿Cómo describirías, desde el punto de vista termodinámico, el fenómeno que acabas de comprobar en este sistema electroquímico?

.....

Los resultados del *item Ci02* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Clara	Darío
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
Relaciones sobre el fenómeno						
Reconocen que el fenómeno observado implica una reacción química		✓		✓		✓
Reconocen que el fenómeno observado implica la existencia de un flujo de corriente eléctrica en la cuba electroquímica	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico						
Describen el proceso termodinámico	✓	✓				✓
Utilizan las variables termodinámicas en la descripción del proceso						
Describen las transferencias de energía implicadas en el proceso termodinámico	✓	✓				✓
Utilizan el concepto de trabajo	✓					
Utilizan el concepto de energía	✓	✓			✓	✓
Justifican las transferencias de energía implicadas en el proceso termodinámico	✓	✓				✓
RELACIONES DESCRIPTIVAS						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Relaciones sobre el sistema y el entorno						
Identifican un sistema termodinámico	✓	✓		✓		✓
Identifican como sistema termodinámico el sistema químico, constituido por los dos electrodos y la disolución acuosa de HCl	✓			✓		✓
Identifican como sistema termodinámico al agua contenida en la cuba		✖				

Identifican un entorno termodinámico (medio exterior al sistema)	✓	✓		✓		✓
Aluden a un medio exterior	✓	✓		✓		✓
Aluden al detector de corriente como un dispositivo situado en el entorno	✓	✓		✓		
Describen la composición química del sistema reaccionante en su estado inicial (reactivos)	✓	✓				✓
Mencionan el Zn	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mencionan el Cu	✓	✓		✓		✓
Mencionan el HCl		✓				✓
Mencionan el H_2O	✓	✓		✓		
Describen la composición química del sistema reaccionante en su estado final (productos)		✓		✓		
Mencionan únicamente el H_2		✓		✓		
Mencionan el $Zn_{(s)}$	✓	✓		✓		✓
Mencionan el $H_2O_{(l)}$	✓	✓		✓		
Describen la composición en fases del sistema reaccionante en su estado final (productos)		✓		✓		
Relaciones sobre el fenómeno						
Recogen observaciones sobre los valores que indica el detector de corriente	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Describen la variable que cuantifica la escala del detector de corriente						
El detector de corriente mide la corriente eléctrica				✓		
El detector de corriente mide el flujo de la corriente eléctrica	✓					✓
El detector de corriente mide la energía eléctrica	✓				✗	
La electricidad del sistema químico hace funcionar el detector de corriente		✗				
Describen cuantitativamente los valores que marca del detector de corriente		✗		✓	✗	
Indican el valor numérico y las unidades de medida (Voltios)				✓		✓
Relacionan los cambios de valor que marca el detector con el establecimiento de "conexiones eléctricas" en el sistema	✓	✓		✓		
Los cambios de valor que marca el detector se deben al cierre del circuito eléctrico formado en la cuba				✓		
Los cambios de valor que marca el detector se deben a la conexión entre los electrodos	✓	✓				
Relacionan los cambios de valor que marca el detector con la reacción química producida en el sistema		✓				✓
Los cambios de valor que marca el detector se deben a la introducción de los electrodos en la cuba		✓				
Los cambios de valor que marca el detector se deben a la introducción de los electrodos en el HCl						✓
Recogen observaciones sobre el *burbujeo* producido		✓		✓		
Consideran que el burbujeo se debe al desprendimiento de un gas		✓		✓		
Identifican el gas responsable de burbujeo como un producto de la reacción		✓		✓		
Identifican el gas responsable de burbujeo como hidrógeno molecular		✓		✓		
Relacionan el burbujeo con la liberación de materia		✓		✓		
Explicitan que los procesos de reacción necesitan del contacto entre los reactivos	✓	✓		✓		✓
Simplemente describen la adición de un reactivo sobre el otro (sin necesario contacto entre las partículas)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan que el establecimiento de un circuito eléctrico necesita del contacto entre los electrodos	✓	✓		✓	✓	✓
Reconocen que el fenómeno observado implica una reacción química		✓		✓		✓

Justifican la identificación del proceso de reacción química		✓		✓		
Identifican la reacción química basándose en el burbujeo observado		✓		✓		
Justifican el hecho de que en el sistema tenga lugar el proceso de reacción química				✓		
La reacción descrita es posible debido a la existencia de un flujo de corriente eléctrica en el sistema químico				✓		
Relaciones sobre las variables termodinámicas						
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓		✓		✓
Relaciones sobre los estados del sistema						
Conciben el proceso (funcionamiento de la segadora) como un *continuum* (de estados del sistema) en el que no diferencian etapas	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Describen algún cambio en el estado del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Describen el cambio en el estado del sistema durante la reacción química		✓		✓		✓
Describen el cambio en el estado del sistema durante el tiempo que está cerrado el circuito eléctrico	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Justifican algunos cambios del sistema basándose en la reacción química que tiene lugar		✓		✓		✓
Justifican el burbujeo basándose en la reacción química		✓		✓		✓
Justifican el paso de la corriente eléctrica basándose en el reacción química						✓
Justifican la liberación de energía al entorno basándose en la reacción química		✓				✓
Justifican algunos cambios del sistema basándose en el establecimiento de un circuito eléctrico en el sistema	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Justifican el burbujeo basándose en el establecimiento de un circuito eléctrico en el sistema						
Justifican el paso de la corriente eléctrica basándose en el establecimiento de un circuito eléctrico en el sistema	✓	✓		✓		✓
Justifican la producción de electricidad basándose en el establecimiento de un circuito eléctrico en el sistema			✓	✓		✓
Justifican la liberación de energía al entorno basándose en el establecimiento de un circuito eléctrico en el sistema	✓					
Justifican la producción de energía en el sistema basándose en el establecimiento de un circuito eléctrico en el sistema					✓	
Relaciones sobre el proceso termodinámico						
Identifican el proceso de reacción química entre el HCl y el Zn	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que el Cu reacciona con el HCl		✓				
Consideran que reaccionan el Zn y el Cu con el HCl		✓				
Consideran que reaccionan el Zn y el Cu entre sí		✓				
Consideran que uno de los productos de la reacción es el hidrógeno molecular		✓		✓		
Consideran que en el sistema tiene lugar un proceso de reacción química, pero no la describen						✖
Recogen algún tipo de observación característica del proceso	✓	✓	✓	✓	✖	✓
Recogen observaciones sobre los valores que indica el detector de corriente	✓	✓	✓	✓	✖	✓
Recogen observaciones sobre el *burbujeo* producido		✓		✓		
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso		✓		✓		✓
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso		✓		✓		
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema						
Hacen referencia explícita a las transferencias de materia sistema – entorno		✓		✓		
Realizan un balance de las transferencias (netas) de materia entre el sistema y el entorno		✓		✓		

Consideran que el sistema libera materia al entorno (hidrógeno, producto de la reacción)		✓		✓		
Reconocen el sentido neto de las transferencias de materia sistema – entorno		✓		✓		
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓				✓
Realizan un balance de las transferencias (netas) de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓				✓
Reconocen el sentido neto de las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓				✓
Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓				✓
Hacen referencia explícita a un flujo de energía a través del sistema					✗	✓
La introducción de los electrodos en el HCl produce un flujo de corriente a través del sistema	✓					✓
La cantidad de energía eléctrica en el sistema aumenta como consecuencia de la introducción de los dos electrodos en la cuba electroquímica (el sistema acumula energía)					✗	
Consideran que la reacción libera energía	✓	✓				✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema						✓
Explican sus observaciones sobre las variaciones de temperatura del sistema como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema		✓				✓
Identifican el trabajo como un proceso de transferencia de energía	✓					
Relacionan la realización del trabajo sobre el entorno con la transferencia de energía desde el sistema hacia el entorno	✓					
Consideran una *equivalencia directa* entre energía y trabajo, en el sentido de que una determinada cantidad de energía sólo puede transferirse (proceso) o movilizarse (forma de energía) por una cantidad de trabajo *igual o equivalente*	✓					
Explicitan la existencia de un "*contenido energético*" intrínseco al sistema (energía interna)		✓			✗	
Consideran que el sistema puede acumular energía sin que ésta le sea transferida desde el entorno					✗	
Consideran que parte de la energía transferida entre sistema y entorno "se pierde" en procesos de transferencia "paralelos a la transferencia de interés"						✓
Utilizan el principio de conservación de la energía					✗	
Utilizan el Primer Principio de la Termodinámica (transferencias de energía)					✗	
Otras relaciones conceptuales						
Apelan a conceptos relacionados con los fenómenos y procesos eléctricos	✓	✗	✗	✓	✓	✓
Apelan al concepto de electrodo	✓			✓	✓	✓
Apelan al concepto de circuito eléctrico	✓			✓		
Apelan al concepto de electricidad			✗			
Apelan al concepto de corriente eléctrica	✓			✓		
Apelan al concepto de flujo de corriente eléctrica	✓			✓		
Apelan al concepto de flujo de energía eléctrica	✓			✓		✗
Apelan al concepto de energía eléctrica					✗	✗
Consideran que la disolución de la cuba electroquímica conduce la corriente eléctrica (forma parte de un circuito eléctrico)	✓			✓		
Relacionan los fenómenos eléctricos observados con los conceptos termodinámicos de energía / transferencias de energía	✓					✓
La conexión entre los electrodos, en un circuito eléctrico, produce una transferencia de energía por el proceso trabajo	✓					

Consideran que en la reacción química se libera energía eléctrica						✓
Relaciones sobre las variables termodinámicas principales						
Relaciones microscópicas						
Relaciones sobre el fenómeno (físico y/o químico)						
Relacionan la reacción química con los valores que indica el detector de corriente						
Relacionan la reacción química con el *burbujeo* observado		✓		✓		

Esta prueba, similar a la anterior, se diseñó para comprobar hasta qué punto los alumnos eran capacces de transferir sus conocimientos sobre la descripción de los sistemas y procesos termodinámicos a reacciones poco conocidas para ellos, en las que además se involucran transferencias de energía por trabajo eléctrico, que no se cuantifican mediante la variación de entalpía.

Las respuestas de los alumnos a esta prueba son menos adecuadas que las que generaron en *Ci01*, debido a las dificultades que se encontraron para transferir sus conocimientos a una reacción que, en general, no fueron capaces de identificar adecuadamente:

[Benito, Ci02(1)]: (…) A que o Cu coa electricidade reacciona coa auga liberando hidróxeno.

Ana, Brais y Clara no hacen referencia a que el proceso observado es una reacción química. La única respuesta de Brais a esta prueba es:

[Brais, Ci02(1)]: Prodúcese electricidade. Que non se produce electricidade. Que se volve producir.

Todos utilizan algún concepto relacionado con la electricidad: "fluxo de corrente eléctrica", relacionado con la obtención de energía por un proceso de trabajo realizado por el gas (Ana), "electricidade" relacionada con el proceso de reacción (Alfonso), "electricidade" sin más explicación (Brais), "electricidade" con la que reacciona el cobre (Benito), "enerxía eléctrica" que aumenta al entrar los electrodos en la disolución (Clara), y "fluxo de enerxía eléctrica" que se libera como consecuencia de la reacción (Darío). Ana es la única que relaciona la generación del gas hidrógeno con la realización de un trabajo de expansión, y ninguno reconoce la producción de transferencias de energía por trabajo eléctrico. Tampoco aplican la noción de variación de entalpía, posiblemente por considerar, como en la prueba anterior, que sus respuestas deben seguir el mismo patrón de ideas que las primeras actividades de la fase previa, cuando no se habían introducido relaciones conceptuales sobre la entalpía de los sistemas.

IV.3.1.3. Descripción de resultados de la prueba *Ci03* de caracterización inicial

Prueba *Ci03*: una de cal... y otra de agua

El hidróxido de calcio, $Ca(OH)_2$, es comúnmente conocido como cal apagada o cal hidratada. Se trata de un compuesto de carácter básico, muy utilizado para el tratamiento del agua.

Se produce a gran escala por la reacción entre la cal viva (óxido de calcio) y el agua:

$$CaO_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow Ca(OH)_{2\ (s)}$$

La formación de 1 mol de cal apagada a partir de sus elementos, en recipiente abierto, libera 65,2 kJ de energía. Teniendo en cuenta, además, los valores de los calores específicos de la cal viva (0,946 J/g°C) y de la cal apagada (1,20 J/g°C):

Ci03[1]

A. Supón que durante la reacción no se disipa energía al ambiente mediante calor o trabajo. ¿Qué temperatura alcanzaría la bodega del barco si 100 L de agua entran en la bodega a 25 °C?

B. ¿Por qué crees que es tan peligroso almacenar o transportar cal viva en las bodegas de los barcos?

Ci03[2]

C. Sabiendo que las variaciones de entalpía estándar de formación del $CaO_{(s)}$ y del $H_2O_{(l)}$ son de -635,6 kJ/mol y -285,8 kJ/mol, respectivamente, calcula la variación de entalpía estándar para la reacción de formación de la cal apagada a 25 °C.

Los resultados del *item Ci03(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Adela	Diana	Clara	Darío
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS								
Relaciones sobre el proceso termodinámico								
Calculan la temperatura (relativa, en la escala Celsius) que alcanzaría la bodega del barco	✓	✗		✗			✗	
Calculan la variación de temperatura que experimentaría la bodega del barco					✗			✗
Obtienen y expresan el resultado de sus cálculos	✓	✗		✗	✗		✗	✗
Justifican su respuesta sobre la variación de temperatura asociada al proceso de reacción propuesto								
Relacionan los resultados obtenidos con la peligrosidad del transporte de la cal viva por vía marítima	✓				✓		✓	✓
Relacionan la peligrosidad del transporte marítimo de la cal viva con el carácter corrosivo de la cal		✗	✗	✗		✗		
RELACIONES DESCRIPTIVAS								
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS								
Relaciones macroscópicas								
Relaciones sobre el sistema y el entorno								

Identifican un sistema termodinámico	✓	✓		✓	✓		✖	✓
Identifican como sistema termodinámico al sistema químico, reaccionante (reactivos – productos)	✓	✓		✓	✓			✓
Identifican dos "sistemas" termodinámicos, cada uno de los dos compuesto por un reactivo							✖	
Identifican un entorno termodinámico (medio exterior al sistema)	✓				✓		✓	✓
Aluden a un medio exterior	✓				✓		✓	✓
Explicitan la composición química inicial del sistema (reactivos)	✓	✓		✓		✓	✓	✓
Describen únicamente la cal viva	✓	✓				✓		
Recogen algún tipo de observación sobre las propiedades químicas de alguna de las sustancias que intervienen en la reacción		✓	✓	✖		✓		
Aluden al carácter corrosivo de la cal viva	✓	✓	✓			✓		
Consideran que los productos resultantes de la reacción entre la cal viva y el agua son altamente peligrosos				✖				
Manifiestan una "duplicidad" del proceso termodinámico propuesto: consideran que consta de un proceso físico y un proceso químico							✖	
Relaciones sobre las variables termodinámicas								
Reconocen la variable temperatura como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Consideran que la temperatura aumenta durante el proceso	✓	✓		✓	✓		✓	✖
Reconocen la variable cantidad de materia como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de masa	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de mol	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓		✓			✓	✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico								
Identifican el proceso termodinámico de reacción química	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Recogen algún tipo de observación característica del proceso	✓				✓		✓	✓
Consideran que se producen variaciones en la temperatura del sistema durante el proceso	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Relacionan el proceso de reacción química con el aumento de temperatura del sistema durante el proceso	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso	✓			✓	✓		✓	✓
Relaciones sobre los estados del sistema								
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican el estado final del sistema (productos)	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Explicitan el concepto de estado de agregación								✓
Consideran que el producto de la reacción permanece en disolución								✓
Justifican algunos cambios del sistema basándose en la reacción química					✓		✓	✓
Justifican el aumento de la temperatura del sistema basándose en la reacción química					✓			
Justifican la liberación de energía desde el sistema hacia el entorno basándose en la reacción química					✓		✓	✓
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema								
Manifiestan que existen diferencias de temperatura entre el sistema y el entorno	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Las diferencias de temperatura entre el sistema y el entorno se deben a que el sistema, inicialmente a la misma temperatura que el entorno, aumenta su temperatura durante la reacción química	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Aluden al contacto entre el sistema y el entorno a través de una pared termodinámica			✓		✓			
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓		✓	✓		✓	✓

Realizan un balance de las transferencias netas de energía entre el sistema y el entorno	✓	✗		✗	✓		✗	✓
Aluden a la reacción química para explicar las transferencias de energía	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno (signo de ΔU)	✓	✓		✓	✓		✓	✗
Consideran que el sistema libera energía debido a la reacción química	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Reconocen el sentido de cada una de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno	✓	✗		✗	✓		✗	✓
Consideran que la "formación" de los productos a partir de los reactivos implica una liberación de energía	✓	✓		✓	✓		✗	✓
Consideran que la "descomposición" de los reactivos en productos implica una liberación de energía	✓	✗		✗	✓		✓	✗
Identifican el calor como un proceso de transferencia de energía	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Relacionan el proceso de calor con la reacción química	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno con la diferencia de temperatura sistema – entorno	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Explican sus observaciones sobre las variaciones de temperatura del sistema como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✓		✓	✓		✓	✗
Explican sus observaciones sobre las variaciones de temperatura del sistema como resultado de la reacción química	✓	✓		✓	✓		✓	✗
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno con las variables termodinámicas	✓	✓		✓	✓		✓	✗
Relacionan el proceso de calor con la diferencia de temperatura entre el sistema y el entorno	✓	✓		✓	✓		✓	✗
Consideran que el calor, liberado de la reacción, se invierte en aumentar la temperatura de las paredes y del entorno					✓			
Clasifican el proceso como exotérmico / endotérmico en función del sentido global de las transferencias de energía sistema - entorno							✓	
El proceso de disolución del NaOH en agua es exotérmico, porque implica una liberación neta de energía al entorno							✓	
Explicitan que los procesos de reacción necesitan del contacto entre los reactivos				✓				✓
Aluden a la acción de "mezclarse" los reactivos				✓				
Justifican su respuesta sobre el valor de *T* basándose en la cantidad de energía puesta en juego en la reacción química	✓	✓		✓	✓		✓	✗
Justifican su respuesta sobre el valor de *T* basándose en el balance global de las transferencias de energía	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Justifican su respuesta sobre el valor de *T* basándose en las variaciones de las variables termodinámicas: ΔH	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Consideran una *equivalencia directa* entre energía (variación de entalpía) y calor, en el sentido de que una determinada cantidad de energía sólo puede transferirse (proceso) o movilizarse (forma de energía) por una cantidad de calor *igual o equivalente*	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Utilizan el principio de conservación de la energía		✗		✗			✗	
Utilizan el Primer Principio de la Termodinámica (transferencias de energía)	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Relaciones sobre las variables termodinámicas principales								
Apelan al concepto de entalpía	✓						✓	✓
Consideran la entalpía una propiedad del sistema termodinámico (variable termodinámica)	✓						✓	✓
Asocian un valor de entalpía a los diferentes estados del sistema (consideran la entalpía una función de estado del sistema)	✓						✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso termodinámico (reacción química)	✓						✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con las transferencias de energía sistema - entorno	✓						✓	✓
Construyen una interpretación macroscópica del concepto entalpía	✓						✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la transferencia neta de energía que implica el	✓						✓	✓

proceso								
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la trasferencia de energía por calor	✓						✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la exotermia del proceso de reacción							✓	
Construyen una interpretación microscópica del concepto entalpía							✓	
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la mayor o menor fortaleza de las interacciones / enlaces involucrados durante el proceso							✓	
Consideran que la ruptura de interacciones y la formación de interacciones en el sistema suponen una contribución energética de idéntico sentido							✓	
Relaciones microscópicas								
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de mol	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de reacción	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de reactivo limitante	✓	✗		✗	✗		✗	✓
Relaciones sobre el sistema								
Apelan a alguna propiedad química de alguna de las sustancias involucradas en la reacción química	✓	✓	✓	✗		✓		
Aluden al carácter corrosivo de la cal viva	✓	✓	✓			✓		
Consideran que los productos resultantes de la reacción entre la cal viva y el agua son altamente peligrosos				✗				
Relaciones sobre el fenómeno – proceso								
Describen químicamente la reacción que tiene lugar en el sistema								
Apelan al concepto de enlace químico								
Apelan al concepto de mol	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Establecen la relación estequiométrica adecuada entre las sustancias químicas involucradas en las reacciones	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Manifiestan que el proceso de reacción química implica la ruptura de enlaces								
Relacionan la reacción química con sus observaciones sobre el cambio de estado termodinámico del sistema	✓	✓		✓	✓		✓	✓

Los resultados del *item Ci03(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	Ana	Alfonso	Adela	Diana	Darío
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS					
Relaciones sobre el proceso termodinámico					
Calculan la variación de entalpía asociada al proceso propuesto (formación de la cal apagada)	✓	✓	✗	✗	✗
Consideran la reacción de la cal viva con el agua como una reacción de formación			✗	✗	✗
Obtienen y expresan el resultado de sus cálculos	✓	✓	✗	✗	✗
RELACIONES DESCRIPTIVAS					
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS					
Relaciones macroscópicas					
Relaciones sobre el sistema y el entorno					
Identifican un sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican como sistema termodinámico al sistema químico, reaccionante (reactivos – productos)	✓	✓			
Identifican un sistema termodinámico químico, reaccionante, cuyos reactivos son la cal viva y el agua, y cuyo producto es la cal apagada			✓		
Identifican un sistema termodinámico químico, reaccionante, cuyo reactivo es la cal apagada, y cuyos productos son la cal viva y el agua				✓	✓

Identifican un entorno termodinámico (medio exterior al sistema)	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a un medio exterior	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan la composición química inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan la composición química final del sistema (producto)	✓	✓	✓	✓	✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado inicial (reactivos)	✓				
Describen la composición en fases del sistema en su estado final (producto)	✓				
Reconocen la variable cantidad de materia como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de masa					
Utilizan el concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen la variable composición en fases como propiedad del sistema termodinámico	✓				
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico					
Identifican el proceso termodinámico de reacción química: la formación de la cal apagada	✓	✓	✗	✗	✗
Identifican como proceso termodinámico la reacción entre la cal viva y el agua para dar cal apagada			✗		
Identifican como proceso termodinámico la reacción de descomposición de la cal apagada para dar cal viva y agua				✗	✗
Consideran la reacción de la cal viva con el agua como una reacción de formación			✗	✗	✗
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso	✓		✓	✓	
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso	✓				
Relaciones sobre los estados del sistema					
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✓	✗	✗	✗
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✗	✗	✗
Identifican el estado final del sistema (productos)	✓	✓	✗	✗	✗
Explicitan el concepto de estado de agregación	✓				
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema					
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Realizan un balance de las transferencias netas de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a la reacción química para explicar las transferencias de energía	✓	✓	✓		✓
Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno (signo de ΔU)	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que el sistema libera energía debido a la reacción química de formación	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno con las variables termodinámicas	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre las variables termodinámicas principales					
Apelan al concepto de entalpía	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran la entalpía una propiedad del sistema termodinámico (variable termodinámica)	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian un valor de entalpía a los diferentes estados del sistema (consideran la entalpía una función de estado del sistema)	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso termodinámico (reacción química)	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con las transferencias de energía sistema - entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación macroscópica del concepto entalpía	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con	✓	✓	✓	✓	✓

la transferencia neta de energía que implica el proceso					
Relaciones microscópicas					
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de reacción	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre el fenómeno – proceso					
Apelan al concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓
Establecen la relación estequiométrica adecuada entre las sustancias químicas involucradas en las reacciones	✓	✓	✓	✓	✓

Todos realizaron cálculos en sus respuestas al item *Ci03(1)*, pero Brais, Benito y Clara dejaron en blaco el espacio reservado para el *item* siguiente.

En el primer *item*, se trataba de que los alumnos hallaran la temperatura final que alcanza un sistema formado por 100 L de agua y la cantidad molar estequiométrica de cal viva (reactivo en exceso), teniendo en cuenta las capacidades caloríficas de las sustancias implicadas en la reacción. A continuación, tenían que relacionar el valor final de temperatura con los daños estructurales que se producirían en el barco mercante.

Las respuestas de los alumnos revelan que han interiorizado las ideas de la ciencia escolar sobre el cálculo del calor implicado en un proceso y de la diferencia de temperatura relacionada con la transferencia de energía entre sistema y entorno, pero la realización de los cálculos los confunde. En el caso de Alfonso, el agotamiento llega hasta tal punto que este chico se ve incapaz de relacionar las elevadas temperaturas obtenidas (930ºC) con la posibilidad de daños catastróficos: una explosión, un incendio, una fusión del casco del barco… Alfonso llega a la conclusión de que transportar cal viva es peligroso porque "a cal viva é un material corrosivo". A la misma observación se remite Diana, que no llega a calcular la temperatura final de la bodega.

La referencia al carácter corrosivo de la cal está en más respuestas, pero como un añadido a las ideas de la ciencia escolar:

[Ana, Ci03(1)]: É perigoso porque a cal viva é corrosiva e pode producirse unha explosión.

[Benito, Ci03(1)]: Porque a cal porde corroer o casco da bodega e producir danos materiais moi perigosos se se mezcla con auga. [Razonamiento similar: Darío]

[Adela, Ci03(1)]: Porque se libera muchísima energía e incrementa la temperatura, corriendo el riesgo de reventar la bodega.

[Clara, Ci03(1)]: Porque ~~cando a cal reacciona coa auga~~ ó reaccionar a cal viva coa auga prodúcese un proceso moi exotérmico.

La realización de los cálculos es en general desorganizada. Ana obtiene un resultado de temperatura final de 759ºC, Alfonso y Benito, una variación de temperatura de 930ºC, Adela, de 2105,2ºC, Clara obtiene una temperatura final de 24,9ºC, y Darío, una variación de temperatura de $-2{,}10 \cdot 10^{-4}$, y Diana ni siquiera extrae los datos numéricos necesarios para hallar la temperatura final.

Las dificultades encontradas en la realización de los cálculos son numerosas, y van desde un valor de masa molecular inadecuado para la cal apagada (Ana), hasta la relaciónde una capacidad de 100 L de agua con la formación de una cantidad de 100 kg de producto (Alfonso y Benito):

[Alfonso, Ci03(1)]: {100 L} → 10^3 Kg

$$100\ \cancel{Kg\ Ca(OH)_2} \times \frac{1000\ \cancel{g}}{1\ \cancel{Kg}} \times \frac{1\ \cancel{mol}}{74'3\ \cancel{g}} \times \frac{65'2\ KJ}{1\ \cancel{mol}} = -8'8 \cdot 10^5\ KJ$$

Clara se puso nerviosa cuando se hizo consciente de que debía calcular la cantidad de mol de cal apagada que se producen en la reacción, y diseñó una regla de tres tautológica basándose en la masa molar del producto:

[Clara, Ci03(1)]: $Mm(Ca(OH)_2) = 40'1 + 2(16+1) = 74'1$ g/mol

1 mol ---------- 74'1 g $Ca(OH)_2$

1 mol ---------- x

x = 74'1 g $Ca(OH)_2$

Por su parte, Darío confundió la cal viva con la cal apagada, y halló el número de mol de producto considerando que se disponía de 1000 kg de él:

[Darío, Ci03(1)]: $\Delta H = m \cdot C_e \cdot \Delta T$

$10^5 \cdot 4'18 \cdot \Delta T$

1 mol $Ca(OH)_2$---------- 74'1 g

x---------- $10 \cdot 10^5$

x = 15.513 moles.

En cuanto al segundo *item*, solamente dos alumnos obtuvieron una respuesta adecuada desde el punto de vista de la ciencia escolar (Ana y Alfonso):

[Ana, Ci03(2)]: I) $H_{2\,(s)} + \frac{1}{2}\ O_{2\,(g)} \rightarrow H_2O_{\,(l)}$ $\quad \Delta H^\circ_f = -285'8$ KJ/mol

(II) $Ca_{\,(s)} + \frac{1}{2}\ O_{2\,(g)} \rightarrow CaO_{\,(s)}$ $\quad \Delta H^\circ_f = -635'6$ KJ/mol

(III) $CaO_{\,(s)} + H_2O_{\,(l)} \rightarrow Ca(OH)_2$

$\Delta H^\circ_f = \Delta H^\circ_f\,(Ca(OH)_2) - \Delta H^\circ_f\,(CaO) - \Delta H^\circ_f\,(H_2O)$

$-65'2 = \Delta H^\circ_f\,(Ca(OH)_2) - (-635'6) - (-285'8)$

$-65'2 = \Delta H^\circ_f\,(Ca(OH)_2) + 635'6) + 285'8$

$-65'2 = \Delta H^\circ_f\,(Ca(OH)_2) + 921'4$

$-65'2 - 921'4 = \Delta H^\circ_f\,(Ca(OH)_2)$

$\boxed{-986'6 = \Delta H^\circ_f\,(Ca(OH)_2)}$

Adela, Clara y Darío no llegaron a un resultado adecuado. Adela no calculó la variación de entalpía de la formación de cal apagada, sino de la reacción propuesta en el *item* anterior, y Darío y Clara realizaron el mismo tipo de cálculo, pero no identificaron adecuadamente los estados inicial y final del proceso, e intercambiaron de orden reactivos y productos.

IV.3.1.4. Descripción de resultados de la prueba *Ci04* de caracterización inicial

Actividad 04: la combustión del metano

Con la ayuda de datos termodinámicos, calcula la ΔH_c asociada a la reacción de combustión del metano gaseoso:

$$CH_{4\ (g)} + 2\ O_{2\ (g)} \rightarrow CO_{2\ (g)} + 2\ H_2O_{\ (l)}$$

Ci04[1]

A. Escribe las ecuaciones termoquímicas correspondientes a las reacciones de formación del $CH_{4\ (g)}$, del $CO_{2\ (g)}$ y del $H_2O_{\ (l)}$

.....

B. Explica cómo y por qué los datos de ΔH_f te ayudarán a calcular ΔH_c $[CH_{4\ (g)}]$

.....

C. Calcula ΔH_c $[CH_{4\ (g)}]$

Ci04[2]

D. Representa la ΔH_c correspondiente a esta reacción química en un diagrama. ¿Qué conclusiones sobre esta reacción puedes extraer del diagrama entálpico?

.....

Los resultados del *item Ci04(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
Relaciones sobre el proceso termodinámico						
Explican cómo y por qué se puede calcular la ΔH asociada a la reacción propuesta, a partir de datos de ΔH_f	✘	✘	✘	✘	✘	✘
Recurren a un razonamiento tautológico	✘					
Apelan a la Ley de Hess, pero sin explicar sus fundamentos teóricos				✓	✓	✓
Apelan a la fórmula general de la variación de entalpía, pero sin explicar sus fundamentos teóricos	✓				✓	✓
Apelan a los fundamentos teóricos de la Ley de Lavoisier-Laplace	✓	✓	✓			

Calculan la variación de entalpía asociada al proceso propuesto (combustión del metano)	✓	✓	✓	✓	✖	✖
No contemplan el carácter extensivo de ΔH en sus cálculos					✖	✖
Obtienen y expresan el resultado de sus cálculos	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RELACIONES DESCRIPTIVAS						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Relaciones sobre el sistema y el entorno						
Identifican un sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican como sistema termodinámico al sistema químico, reaccionante (reactivos – productos)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican un entorno termodinámico (medio exterior al sistema)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a un medio exterior	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan la composición química inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓	✖
Explicitan la composición química final del sistema (producto)	✓	✓	✓	✓	✓	✖
Describen la composición en fases del sistema en su estado inicial (reactivos)				✓		✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado final (producto)	✓			✓		✓
Relaciones sobre las variables termodinámicas						
Reconocen la variable cantidad de materia como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓		
Utilizan el concepto de mol	✓	✓	✓	✓		
Reconocen la variable composición en fases como propiedad del sistema termodinámico	✓			✓		✓
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan las variaciones de las variables termodinámicas con el tiempo	✓			✓		✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico						
Identifican el proceso termodinámico de reacción química: la combustión del metano	✓	✓	✓	✓	✓	✖
Identifican como proceso termodinámico la reacción inversa a la combustión del metano						✖
Describen el tipo de reacción química que tiene lugar	✓	✓	✓	✖	✓	✓
Consideran que la reacción propuesta es una reacción de combustión	✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que la reacción propuesta es una reacción de formación				✖		
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso	✓					
Relaciones sobre los estados del sistema						
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✓	✓	✓	✓	✖
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓	✖
Identifican el estado final del sistema (productos)	✓	✓	✓	✓	✓	✖
Explicitan el concepto de estado de agregación	✓			✓		✓
Justifican la liberación de energía desde el sistema hacia el entorno basándose en la reacción química		✓	✓			
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema						
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Realizan un balance de las transferencias netas de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a la reacción química para explicar las transferencias de energía	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno (signo de ΔH)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que el sistema libera energía debido a la reacción química de combustión	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que la degradación de compuestos químicos supone una liberación de energía		✓	✓			
Consideran que la "formación" de los productos a partir de los reactivos implica una liberación de energía		✓	✓			
Reconocen que la formación de compuestos químicos supone una absorción de energía		✓	✓			
Consideran que la "descomposición" de los reactivos en productos implica una liberación de energía		✓	✓			
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno con las variables termodinámicas	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que el sistema solamente puede intercambiar con el entorno una determinada cantidad de energía (energía puesta en juego en el proceso: ΔU *ó* ΔH)		✓	✓			
Identifican ΔU ó ΔH como la cantidad energía puesta en juego en la reacción		✓	✓			
Explicitan que ΔU ó ΔH representan una variación de energía del sistema (cambio de estado termodinámico)		✓	✓			
La cantidad de energía puesta en juego en la reacción es la misma, independientemente de las condiciones de reacción: ΔU ó ΔH son funciones de estado		✓	✓			
Utilizan el principio de conservación de la energía		✓	✓			
Utilizan la Ley de Lavoisier-Laplace		✓	✓			
Utilizan la Ley de Hess	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre las variables termodinámicas principales						
Apelan al concepto de entalpía	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran la entalpía una propiedad del sistema termodinámico (variable termodinámica)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian un valor de entalpía a los diferentes estados del sistema (consideran la entalpía una función de estado del sistema)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso termodinámico (reacción química)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Manifiestan alguna confusión entre H y ΔH					✗	
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con las transferencias de energía sistema - entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación macroscópica del concepto entalpía	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la transferencia neta de energía que implica el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones microscópicas						
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de reacción	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de combustión	✓	✓	✓		✓	✓
Relaciones sobre el fenómeno – proceso						
Apelan al concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Establecen la relación estequiométrica adecuada entre las sustancias químicas involucradas en las reacciones	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Los resultados del *item Ci04(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	**Ana**	**Alfonso**	**Benito**	**Adela**	**Clara**	**Darío**

ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
Relaciones sobre el proceso termodinámico						
Identifican el proceso termodinámico propuesto: la reacción de combustión del metano	✓	✓		✓	✓	✓
Realizan una representación gráfica que puede considerarse un diagrama entálpico	✓	✖		✓	✖	✓
No realizan ningún tipo de representación gráfica, sino que escriben las ecuaciones termoquímicas correspondientes al proceso de reacción propuesto, y las reacciones con él relacionadas			✖			
Describen el diagrama entálpico, o realizan algún tipo de comentario o conclusión sobre él	✓			✓		
RELACIONES DESCRIPTIVAS						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Relaciones sobre el sistema y el entorno						
Identifican un sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✖	✓
Identifican como sistema termodinámico al sistema químico, reaccionante (reactivos – productos)	✓	✓	✓	✓	✖	✓
Explicitan la composición química inicial del sistema (reactivos)	✖	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan la composición química final del sistema (productos)	✓	✓	✓	✓	✖	✓
Explicitan la existencia de $C_{(s)}$ y $H_{2\,(g)}$ en la composición química –¿del sistema?					✖	
Describen la composición en fases del sistema en su estado inicial (reactivos)					✓	
Describen la composición en fases del sistema en su estado final (producto)					✖	
Manifiestan algún tipo de confusión entre el sistema termodinámico y el estado termodinámico	✖					
Relaciones sobre las variables termodinámicas						
Consideran que la presión permanece constante durante el proceso		✖	✖			
Reconocen la variable cantidad de materia como propiedad del sistema termodinámico	✓		✓	✓		✓
Utilizan el concepto de mol	✓		✓	✓		✓
Reconocen la variable composición en fases como propiedad del sistema termodinámico				✓		
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✖	✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico						
Identifican el proceso termodinámico de reacción química: la combustión del metano	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Manifiestan que la reacción química tiene lugar en condiciones de presión constante						
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso					✓	
Relaciones sobre los estados del sistema						
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✖	✓	✓	✖	✖
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos)	✓	✖	✓	✓	✖	✓
Identifican el estado final del sistema (productos)	✓	✓	✓	✓	✓	✖
Explicitan el concepto de estado termodinámico	✓		✓	✓		✓
Explicitan el concepto de estado de agregación				✓		
Describen el cambio en el estado del sistema durante el proceso de reacción química	✖	✓	✓	✖	✖	✓
Justifican algunos cambios del sistema basándose en la reacción química	✖			✖		✓

Justifican la liberación de energía desde el sistema hacia el entorno basándose en la reacción química	✓			✓		
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema						
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Realizan un balance de las transferencias netas de energía entre el sistema y el entorno	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a la reacción química para explicar las transferencias de energía	✗	✓	✓	✗	✓	✓
Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno (signo de ΔH)	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Consideran que el sistema libera energía debido a la reacción química de combustión	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Clasifican el proceso como exotérmico / endotérmico en función del sentido global de las transferencias de energía sistema - entorno	✓			✓		
El proceso de combustión del metano es exotérmico, porque implica una liberación neta de energía al entorno	✓			✓		
Explicitan la existencia de un "*contenido energético*" intrínseco al sistema (entalpía)	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Explicitan que ΔU ó ΔH representan una variación de energía del sistema (cambio de estado termodinámico)	✓			✗		
Justifican su respuesta sobre el valor de ΔH basándose en la cantidad de energía puesta en juego en la reacción química	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Justifican su respuesta sobre el valor de ΔH basándose en el balance global de las transferencias de energía	✗	✗	✓	✗	✗	✓
Utilizan la Ley de Lavoisier-Laplace			✓			
Utilizan la Ley de Hess			✓			
Relaciones sobre las variables termodinámicas principales						
Apelan al concepto de entalpía	✗	✗	✓	✗	✓	✓
Consideran la entalpía una propiedad del sistema termodinámico (variable termodinámica)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso termodinámico (reacción química)	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con las transferencias de energía sistema - entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación macroscópica del concepto entalpía	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la transferencia neta de energía que implica el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones microscópicas						
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓		✓	✓		✓
Utilizan el concepto de mol	✓		✓	✓		✓
Utilizan el concepto de reacción	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de reactivo/producto	✓			✓		
Relaciones sobre el fenómeno – proceso						
Apelan al concepto de mol	✓		✓	✓		✓
Establecen la relación estequiométrica adecuada entre las sustancias químicas involucradas en las reacciones	✓		✓	✓		✗

Los cálculos realizados en esta prueba son muy similares a los anteriores, por lo que se describen brevemente:

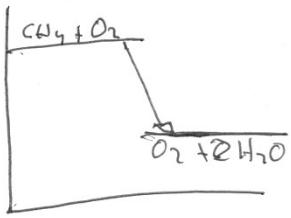
Sólo Ana y Adela realizaron los cálculos adecuadamente. También Alfonso planteó bien el ejercicio numérico, y relacionó la simbología matemática y los cálculos con las ideas de la ciencia escolar; pero aunque los valores numéricos eran correctos, probablemente cometió algún error al introducir los datos con la

calculadora; Benito, al copiar la respuesta de Alfonso, no reparó en el error (el resultado de Alfonso, -802,2 kJ, es plausible). Clara y Darío, operando exactamente igual que Alfonso y Benito, obtuvieron resultados diferentes de ellos. Este hecho (seis alumnos que realizan el mismo planteamiento con los mismos valores numéricos y las mismas operaciones, y se llega a 5 resultados numéricos diferentes) ilustra las dificultades que tenían estos estudiantes en realizar adecuadamente incluso ejercicios mecánicos con solamente operaciones matemáticas básicas.

En todo caso, los resultados de todos ellos permiten llegar a la misma conclusión: la reacción de combustión del metano es exotérmica.

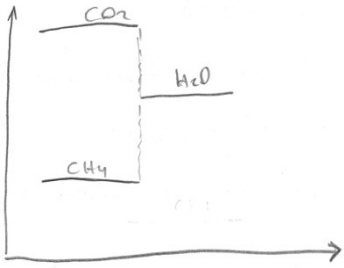
Las gráficas realizadas por los alumnos son similares a las realizadas en las actividades de la fase previa. Las únicas que revelan las ideas de la ciencia escolar son las de Ana y Darío, similares entre sí:

[Darío, Ci04(2)]:



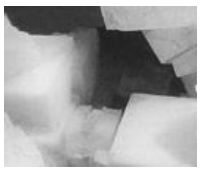
La gráfica de Alfonso pone de manifiesto la confusión que tenía este alumno con la definición de los estados inicial y final del sistema:

[Alfonso, Ci04(2)]:



IV.3.1.5. Descripción de resultados de la prueba *Ci05* de caracterización inicial

Actividad 05: el ciclo de Born-Haber y la energía reticular de los sólidos iónicos



El cloruro sódico, NaCl, constituyente mayoritario de la sal de mesa, es un compuesto iónico que a *T* y *p* ambiente se presenta en forma sólida cristalina. Su punto de fusión es de 810 °C. Las fuertes interacciones que establecen los iones dentro de la red cristalina hacen que el cristal de NaCl sea muy estable. Por eso es tan elevado el punto de fusión del compuesto.

Si queremos conocer la energía asociada a las interacciones de los iones en la red cristalina de esta sal iónica, el mejor método sería medir experimentalmente, en un calorímetro, la variación de entalpía del proceso de disociación representado en la siguiente ecuación♣:

$$NaCl_{(s)} \rightarrow Na_{(g)} + Cl_{(g)} \qquad \Delta H_{red}$$

Sin embargo, en el calorímetro no es posible realizar esta disociación.

Para resolver este problema, pues, hay que calcular ΔH a través de datos indirectos de los que sí disponemos, y que se refieren a procesos relacionados con el que queremos estudiar. El mejor método consiste en establecer un ciclo de ecuaciones termoquímicas que nos ayude a calcular la variación de entalpía asociada a la formación de la sal iónica sólida a partir de sus elementos en estado natural: $Na_{(s)}$ y $\frac{1}{2}\ Cl_{2\ (g)}$.

$$Na^{+}_{(g)} + Cl^{-}_{(g)} \rightarrow NaCl_{(s)} \qquad \Delta H_f$$

Este ciclo, denominado "ciclo de Born-Haber", permite calcular de forma sencilla la energía de red del NaCl como la variación de entalpía ΔH_{red}.

Ci$_{05}$[1]

A. Vas a calcular, con ayuda de ΔH_f, ΔH_{red} para el NaCl. ¿Cómo se relacionan estas dos variaciones de entalpía, ΔH_{red} y ΔH_f?

.....

B. ¿Qué pasos tendrías en cuenta para calcular, mediante un ciclo de Born-Haber, la energía reticular del cloruro sódico?

.....

C. Calcula la energía reticular del cloruro sódico a partir del ciclo de Born-Haber.

.....

♣ *Se conoce como energía de red (o energía reticular) de un sólido iónico a la energía necesaria para separar completamente un mol de un sólido iónico en sus iones en fase gaseosa; su valor coincide con la variación de entalpía asociada al proceso inverso (y suele simbolizarse como ΔH_{red}).*

Ci$_{05}$[2]

D. Elabora un diagrama de energía desde se vean reflejadas las diferentes etapas del ciclo de Born-Haber. ¿Qué conclusiones sobre la formación de la red iónica NaCl puedes extraer del diagrama entálpico?

Los resultados del *item Ci05(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	Ana	Alfonso	Adela	Clara	Darío
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS					
Relaciones sobre el proceso termodinámico					
Explicitan las etapas (procesos termodinámicos) que utilizan para calcular la ΔH_{red} asociada a la constitución de la red cristalina del $NaCl_{(s)}$	✓	✓	✓	✓	✓

Calculan la ΔH_{red} asociada a la constitución dela red cristalina del $NaCl_{(s)}$	✖	✖	✓	✓	✓
Calculan la ΔH_f por confundirla con la ΔH_{red}	✖	✖			✖
Obtienen y expresan el resultado de sus cálculos	✖	✖	✖	✓	✓
RELACIONES DESCRIPTIVAS					
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS					
Relaciones macroscópicas					
Relaciones sobre el sistema y el entorno					
Identifican un sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican como sistema termodinámico al sistema químico, reaccionante (reactivos – productos)	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican un entorno termodinámico (medio exterior al sistema)	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a un medio exterior	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan la composición química inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan la composición química final del sistema (producto)	✓	✓	✓	✓	✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado inicial (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado final (producto)	✓	✓	✓	✓	✓
Manifiestan algún tipo de confusión entre el proceso termodinámico y los aspectos energéticos del proceso		✖	✖	✖	
Enuncian "el calor de formación" como etapa del proceso "global"			✖		
Enuncian "la afinidad electrónica" como etapa del proceso "global"		✖			
Enuncian "la energía de ionización" como etapa del proceso "global"		✖			
Enuncian "la energía de sublimación" como etapa del proceso "global"				✖	
Relaciones sobre las variables termodinámicas					
Reconocen la variable cantidad de materia como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen la variable composición en fases como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre el proceso termodinámico					
Identifican el proceso termodinámico propuesto: la constitución de la red iónica del $NaCl_{(s)}$	✖	✖	✓	✓	✖
Identifican como proceso termodinámico la formación del NaCl a partir de sus elementos	✖	✖		✓	✖
Describen el tipo de reacción química que tiene lugar		✖			
Consideran que la reacción propuesta es una reacción posible		✖			
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre los estados del sistema					
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican el estado final del sistema (productos)	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan el concepto de estado de agregación	✓	✓	✓	✓	✓
Justifican la liberación de energía desde el sistema hacia el entorno basándose en la reacción química	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema					
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Realizan un balance de las transferencias netas de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓

Aluden a la reacción química para explicar las transferencias de energía	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno (signo de ΔH_{red})	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que el sistema libera energía debido a la reacción química	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen el sentido de cada una de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que la sublimación de un sólido implica una absorción de energía	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que la formación de un catión a partir de un átomo neutro implica una absorción de energía	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que la disociación de una molécula diatómica en sus átomos implica una absorción de energía	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que la formación de un anión a partir de un átomo neutro implica una liberación de energía	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que la formación de una red iónica (estable) implica una absorción de energía	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que la formación de compuestos (estables) implica una liberación de energía	✓				
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno con las variables termodinámicas	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que el sistema solamente puede intercambiar con el entorno una determinada cantidad de energía (energía puesta en juego en el proceso: ΔU ó ΔH)		✓	]	✓	
Identifican ΔU ó ΔH como la cantidad energía puesta en juego en la reacción	✓	✓		✓	
Explicitan que ΔU ó ΔH representan una variación de energía del sistema (cambio de estado termodinámico)	✓	✓		✓	
Relacionan la energía puesta en juego en el proceso (ΔU ó ΔH) con los procesos de calor y trabajo			✓		
Utilizan la Ley de Lavoisier-Laplace	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan la Ley de Hess	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre las variables termodinámicas principales					
Apelan al concepto de entalpía	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran la entalpía una propiedad del sistema termodinámico (variable termodinámica)	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian un valor de entalpía a los diferentes estados del sistema (consideran la entalpía una función de estado del sistema)	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen el carácter extensivo de la variable entalpía	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso termodinámico propuesto	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía a los procesos termodinámicos relacionados con el proceso propuesto	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso de sublimación del sodio sólido	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso de disociación del cloro molecular	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso de ionización del sodio y del cloro (atómicos y en fase gaseosa)	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan la nomenclatura de U para la energía de red	✗	✗	✗	✗	✗
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con las transferencias de energía sistema - entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía del proceso de sublimación del sodio sólido, con la energía de sublimación				✓	
Relacionan la variación de entalpía del proceso de disociación del cloro molecular, con	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía del proceso de ionización del sodio y del cloro (atómicos y en fase gaseosa), con	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación macroscópica del concepto entalpía	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la transferencia neta de energía que implica el proceso	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la trasferencia de energía por calor	✓				

Relaciones microscópicas					
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de ionización			✓	✓	
Utilizan el concepto de sublimación		✓	✓	✓	
Utilizan el concepto de afinidad electrónica		✗			
Utilizan el concepto de disociación	✗	✓	✓	✓	
Utilizan el término "disolución" para referirse a la disociación de una molécula en átomos	✗				
Relaciones sobre el fenómeno – proceso					
Apelan al concepto de mol	✓	✓	✓	✓	✓
Establecen la relación estequiométrica adecuada entre las sustancias químicas involucradas en las reacciones	✓	✓	✓	✓	✓

Los resultados del *item Ci05(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	**Ana**	**Alfonso**	**Adela**	**Clara**	**Darío**
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS					
Relaciones sobre el proceso termodinámico					
Identifican el proceso termodinámico propuesto: la constitución de la red iónica del $NaCl_{(s)}$	✓	✓	✗	✓	✓
Realizan una representación gráfica que puede considerarse un diagrama entálpico			✗		
No realizan ningún tipo de representación gráfica, sino que escriben las ecuaciones termoquímicas correspondientes al proceso de reacción propuesto, y las reacciones con él relacionadas	✗	✗		✗	✗
Describen la representación, o realizan algún tipo de comentario o conclusión sobre ella	✓				
RELACIONES DESCRIPTIVAS					
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS					
Relaciones macroscópicas					
Relaciones sobre el sistema y el entorno					
Identifican un sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Identifican como sistema termodinámico al sistema químico, reaccionante (reactivos – productos)	✓	✓		✓	✓
Identifican como sistema termodinámico algunas de las especies derivadas de los elementos cloro y sodio			✓		
Identifican un entorno termodinámico (medio exterior al sistema)	✓	✓		✓	✓
Aluden a un medio exterior	✓	✓		✓	✓
Explicitan la composición química inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓
Explicitan la composición química final del sistema (producto)	✓	✓	✓	✓	✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado inicial (reactivos)	✓	✓	✓	✓	✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado final (producto)	✓	✓	✓	✓	✓
Recogen algún tipo de observación sobre las propiedades químicas de alguna de las sustancias que intervienen en la reacción	✓				
Comentan la variación en la estabilidad relativa del sistema a lo largo del proceso	✓				
Explicitan una clasificación del sistema según el número de fases presentes en alguno de los estados termodinámicos por los que pasa el sistema a lo largo del proceso					
Manifiestan algún tipo de confusión entre el sistema termodinámico y el proceso que éste sufre					
Manifiestan algún tipo de confusión entre el proceso termodinámico y los aspectos energéticos del proceso			✗		

Confunden (representan de idéntica manera) las etapas de las que consta el proceso, con los cambios energéticos que implican (a nivel global)			✖		
Relaciones sobre las variables termodinámicas					
Reconocen la variable cantidad de materia como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de masa					
Utilizan el concepto de mol	✓	✓		✓	✓
Reconocen la variable composición en fases como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan las variaciones de las variables termodinámicas con el tiempo					
Relaciones sobre el proceso termodinámico					
Identifican el proceso termodinámico propuesto: la constitución de la red iónica del $NaCl_{(s)}$	✓	✓	✖	✓	✓
Identifican como proceso termodinámico la evolución de las especies de cloro y sodio			✖		
Describen el tipo de reacción química que tiene lugar	✓				
Describen la reacción como la formación de un compuesto	✓				
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso	✓	✓	✓	✓	✓
Relaciones sobre los estados del sistema					
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...)	✓	✓	✖	✓	✓
Identifican el estado inicial del sistema (reactivos)	✓	✓	✖	✓	✓
Identifican el estado final del sistema (productos)	✓	✓	✖	✓	✓
Identifican estados "intermedios" del sistema	✓	✓	✖	✓	✓
Explicitan el concepto de estado de agregación	✓	✓	✓	✓	✓
Describen el cambio en el estado del sistema durante el proceso de reacción química	✓	✓	✖	✓	✓
Justifican la liberación de energía desde el sistema hacia el entorno basándose en la reacción química	✓	✓	✖	✓	✓
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema					
Hacen referencia explícita a las transferencias de energía sistema – entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Realizan un balance de las transferencias netas de energía entre el sistema y el entorno	✓	✓	✖	✓	✓
Aluden a la reacción química para explicar las transferencias de energía	✓	✓	✖	✓	✓
Reconocen el sentido global de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno (signo de ΔH_{red})	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que el sistema libera energía debido a la reacción química	✓	✓	✓	✓	✓
Establecen un balance energético adecuado, aunque la reacción considerada sea inadecuada			✖		
Reconocen el sentido de cada una de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno			✓		
Reconocen que la sublimación de un sólido implica una absorción de energía			✓		
Reconocen que la formación de un catión a partir de un átomo neutro implica una absorción de energía			✓		
Reconocen que la disociación de una molécula diatómica en sus átomos implica una absorción de energía			✓		
Reconocen que la formación de un anión a partir de un átomo neutro implica una liberación de energía			✖		
Reconocen que la formación de una red iónica (estable) implica una absorción de energía			✓		
Reconocen que la formación de compuestos (estables) implica una liberación de energía	✓				
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno como resultado de una interacción entre los reactivos del sistema	✓	✓		✓	✓
Relacionan las transferencias de energía sistema – entorno con las variables	✓	✓	✓	✓	✓

termodinámicas					
Identifican ΔU ó ΔH como la cantidad energía puesta en juego en la reacción	✓	✓	✖	✓	✓
Explicitan que ΔU ó ΔH representan una variación de energía del sistema (cambio de estado termodinámico)	✓	✓	✖	✓	✓
Justifican su respuesta sobre el valor de ΔH basándose en el balance global de las transferencias de energía	✓	✓	✖	✓	✓
Utilizan la Ley de Lavoisier-Laplace	✓	✓	✖	✓	✓
Utilizan la Ley de Hess	✓	✓	✖	✓	✓
Relaciones sobre las variables termodinámicas principales					
Apelan al concepto de entalpía	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran la entalpía una propiedad del sistema termodinámico (variable termodinámica)	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian un valor de entalpía a los diferentes estados del sistema (consideran la entalpía una función de estado del sistema)	✓	✓		✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso termodinámico propuesto	✓	✓	✓	✓	✓
Asocian una variación de entalpía a los procesos termodinámicos relacionados con el proceso propuesto	✓	✓	✖	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso de sublimación del sodio sólido	✓	✓	✖	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso de disociación del cloro molecular	✓	✓	✖	✓	✓
Asocian una variación de entalpía al proceso de ionización del sodio y del cloro (atómicos y en fase gaseosa)	✓	✓	✖	✓	✓
Utilizan la nomenclatura de U para la energía de red	✖	✖	✖	✖	✖
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con las transferencias de energía sistema - entorno	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación macroscópica del concepto entalpía	✓	✓	✓	✓	✓
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la transferencia neta de energía que implica el proceso	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación microscópica del concepto entalpía	✓				
Relacionan la variación de entalpía, asociada al proceso termodinámico, con la mayor o menor estabilidad de los productos formados durante el proceso	✓				
Relaciones microscópicas					
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de mol	✓	✓		✓	✓
Utilizan el concepto de ionización	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de sublimación	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de afinidad electrónica	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan el concepto de disociación	✓	✓		✓	✓
Relaciones sobre el sistema					
Apelan a alguna propiedad química de alguna de las sustancias involucradas en la reacción química	✓				
Aluden a la estabilidad del compuesto formado (NaCl)	✓				
Relaciones sobre el fenómeno – proceso					
Describen químicamente la reacción que tiene lugar en el sistema	✓				
Describen la reacción con la formación de un compuesto químico	✓				
Apelan al concepto de mol	✓	✓		✓	✓
Establecen la relación estequiométrica adecuada entre las sustancias químicas involucradas en las reacciones	✓	✓		✓	✓
Relacionan la reacción química con sus observaciones sobre el cambio de estado termodinámico del sistema	✓				

Por su parte, Ana y Alfonso confundieron la energía de red con la variación de entalpía de formación. Adela, Clara y Darío realizaron cálculos adecuados:

[Alfonso, Ci05(1)]:

$\Delta H_f = \Delta H_s + \Delta H_{EI} + \frac{1}{2}\Delta H_D + \Delta H_{AE} + U$

$\Delta H_f = 109 + 495 + 121 - 348 - 788 = -441$ KJ/mol

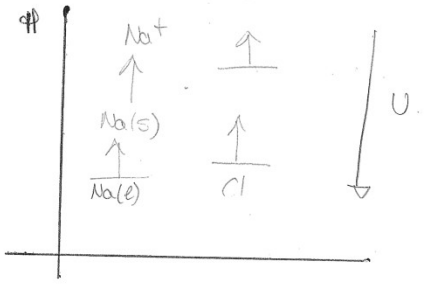
[Clara, Ci05(1)]:

$U = \Delta H_s + \Delta H_{EI} + \frac{1}{2}\Delta H_D + \Delta H_{AE} - \Delta H$

$U = 109 + 495 + 121 - 348 + 441 = -788$ KJ/mol

En el *item* segundo, Ana, Alfonso, Clara y Darío escribieron el ciclo de Born-Haber en lugar del diagrama entálpico. Por su parte, Adela fue la única que intentó establecer el diagrama entálpico, pero la multiplicidad de estados que representar le hizo desistir sin completarlo:

[Adela, Ci05(2)]:



IV.3.2. Análisis mediante esquemas de conocimiento

En este apartado se analizan los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los alumnos en las pruebas de caracterización inicial de la muestra. Se elaboraron cinco esquemas de razonamiento: ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***); y cuatro esquemas de acción: ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***).

De las manifestaciones escritas que produjeron los estudiantes en sus respuestas a las pruebas *Ci01*,…,*Ci05*, se han extraído las relaciones fundamentales que constituyen esquemas de razonamiento y acción. Para identificar regularidades en los esquemas, se han elaborado las tablas que figuran a lo largo de los apartados siguientes, y en las que se recogen las relaciones pertenecientes a cada ***ER*** o ***EA***, asociadas a la activación que generó cada individuo de la muestra.

En los dos apartados siguientes se describen e interpretan los esquemas de razonamiento (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento* ***ER1,*** …, ***ER5***, pág. 879) y acción (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción* ***EA1,*** …, ***EA4***, pág. 919) idiosincrásicos de los alumnos, ordenados en función del

esquema del que forman parte y de la complejidad de la estructura esquemática. Cada apartado dedicado a un esquema contiene a su vez dos: en el titulado "Análisis general de los resultados" se detalla la frecuencia activación de las relaciones de la ciencia escolar para las dimensiones establecidas, y en los "esquemas idiosincrásicos de los alumnos", se describen las tablas de datos.

IV.3.2.1. Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento *ER1, …, ER5*

Los cinco apartados que vienen a continuación se dedican a la descripción de los esquemas de razonamiento ***ER1*** (*Esquema* ***ER1****: sistemas termodinámicos*, pág. 879), ***ER2*** (*Esquema* ***ER2****: procesos termodinámicos*, pág. 891), ***ER3*** (*Esquema* ***ER3****: aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*, pág. 901), ***ER4*** (*Esquema* ***ER4****: Dinámica de los procesos químicos*, pág. 910) y ***ER5*** (*Esquema* ***ER5****: aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*, pág. 916) que activaron los alumnos de la muestra en las pruebas de caracterización inicial.

Esquema *ER1*: *sistemas termodinámicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER1*** (***Sistemas termodinámicos***) que desarrollaron los alumnos en la caracterización inicial.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 39* recoge las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, con la frecuencia de activación *f* de cada relación, esto es, el número de veces que los alumnos hicieron explícita cada relación en sus respuestas a las tareas de las pruebas. En la última columna de la tabla se listan los códigos (***Cód***) que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, representadas por el símbolo ***S***.

Tabla 39: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Sistemas termodinámicos (ER1)****, extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	30	***S01***
UNIVERSO consta de ENTORNO	30	***S02***
SISTEMA tiene MATERIA	31	***S03***
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	5	***S04***
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	5	***S05***
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	28	***S06***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	28	***S07***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	5	***S08***
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	31	***S09***
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	25	***S10***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	8	***S11***
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	8	***S12***
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	8	***S13***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	6	***S14***
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	6	***S15***

SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	0	***S16***
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	0	***S17***
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	7	***S18***
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	27	***S19***
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	***S20***
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	32	***S21***
FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	0	***S22***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	29	***S23***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	0	***S24***
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	24	***S25***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	21	***S26***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	26	***S27***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	0	***S28***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	***S29***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	29	***S30***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	26	***S31***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	13	***S32***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	19	***S33***
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	19	***S34***
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	17	***S35***
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	8	***S36***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	6	***S37***
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	18	***S38***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	7	***S39***
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	17	***S40***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	14	***S41***
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	7	***S42***
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	0	***S43***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	18	***S44***
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	0	***S45***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	4	***S46***
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	3	***S47***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	30	***S48***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	26	***S49***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	13	***S50***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	25	***S51***
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	1	***S52***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	17	***S53***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	0	***S54***
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	0	***S55***
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	0	***S56***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	0	***S57***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	18	***S58***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	18	***S59***

Los estudiantes activaron 46 del total de 59. En la secuencia *Termoquímica*, en la cual se realizaron 10 actividades más, y con ayuda del profesor, habían activado 51. Con respecto a la fase previa, quedaron 7 relaciones sin activar: ***S16*** y ***S17*** (correspondientes a la identificación de los *sistemas aislados*, que no se pide expresamente en las pruebas), la declaración de ***funciones de estado*** con las que describir el ***universo***, las tres relaciones sobre la *composición en fases* y la clasificación de los ***sistemas termodinámicos*** en atención a ella, y la definición de la temperatura como *temperatura absoluta*; sin embargo, es la primera vez que los alumnos aluden por primera vez a la naturaleza *intensiva* de esta ***magnitud termodinámica básica***. Las relaciones de mayor frecuencia en las pruebas de la caracterización inicial se refieren al reconocimiento del sistema termodinámico (no tanto de su entorno), y a la determinación de los estados termodinámicos utilizando las siguientes magnitudes: cantidad de energía, estados de agregación y composición química.

De las 42 relaciones del dominio macroscópico de representación del conocimiento, se activaron 33 (frente a las 37 de la fase previa), con un valor de $f_{(macro)}$ **= 608**, un promedio de activación $\bar{x}_{(macro)}$ **= 14** y desviación típica $\sigma_{(macro)}$ **= 12**. De las 17 relaciones microscópicas de ***ER1*** se utilizaron 13, con una frecuencia de activación $f_{(micro)}$ **= 185** y un promedio elevado, puesto que la media aritmética de frecuencias es $\bar{x}_{(micro)}$ **= 11**, con desviación típica $\sigma_{(micro)}$ **= 10**. En comparación con la fase previa, los valores de ***Ci*** resultan pequeños, aunque hay que tener en cuenta que las frecuencias de activación dependen del número de actividades o pruebas, que es el triple en la unidad *Termoquímica* que en la batería de caraterización inicial. Los promedios y desviaciones típicas de ***Ci*** están afectados por la presencia de tres alumnos (Carlos, Berta y Débora) que no realizaron las pruebas.

Para eliminar la influencia de sus datos de la muestra, se puede estimar una media de activación por alumno y actividad o prueba, dividiendo las frecuencias de activación de la fase previa entre el producto del número de alumnos que responden a las actividades por el número de actividades o pruebas. Al comparar las medias de ***Ci*** y ***Fp***, se obtienen los siguientes resultados:

La activación media de relaciones de ***ER1*** por cada alumno y prueba es favorable a la caracterización inicial en el caso de las relaciones ***S11***, ***S12*** y ***S13*** (sobre los *sistemas abiertos*), ***S27*** (reconocimiento del *estado gaseoso*), asociado al ***S37*** (las *magnitudes termodinámicas básicas* pueden ser *extensivas*) y ***S33*** (las *magnitudes termodinámicas básicas* dependen de la *composición química*). En las demás relaciones las diferencias de activación son favorables a la fase previa, aunque no sobrepasan en ningún caso el valor 0,3. Estos datos indican que los alumnos no utilizaron en la misma medida las relaciones de ***ER1*** sin ayuda del profesor, de lo que se deduce que algunas de ellas se encuentran todavía en el nivel de desarrollo potencial.

En general, los alumnos construyeron descripciones e interpretaciones eminentemente macroscópicas para resolver las cuestiones planteadas en las actividades de la fase previa, como era de esperar. Las desviaciones típicas $\sigma_{(macro)}$ y $\sigma_{(micro)}$ revelan que la activación de las relaciones sigue siendo desigual en la muestra, así que es de esperar que la distribución de los esquemas ***ER1*** del alumnado contenga variedad de niveles y/o subniveles.

Al comparar las frecuencias de activación y sus correspondientes promedios para las 16 relaciones ya conocidas y las 43 relaciones nuevas, se siguen obteniendo promedios de activación bastante dispares: $f_{(no\ nuevas)}$ **= 229**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 14** y desviación $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 12**, frente a $f_{(nuevas)}$ **= 564**, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 13**, y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 10**. Así pues, los estudiantes utilizaron las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones, sobre la base de las ya conocidas. Se mantiene una escasa

diferencia entre los promedios de las frecuencias de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ y $\bar{x}_{(nuevas)}$, lo que es un buen indicador de aprendizaje. Sin embargo, los resultados de activación no son todo lo buenos que cabría esperar para 2º de Bachillerato.

En la *Tabla 40* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Sistemas termodinámicos***, para cada una de las 5 pruebas de la caracterización inicial. Los datos de la tabla se han organizado en las cinco columnas que se describieron en el ***Capítulo III***:

Tabla 40: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos (ER1)*** *en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial*

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	221	8	33	(21,31)
Ci02	56	5	16	(0,13)
Ci03	203	7	34	(0,34)
Ci04	164	8	27	(9,27)
Ci05	149	5	32	(0,32)

Aunque 10 alumnos se presentaron a las pruebas (todos menos Débora), 8 entregaron los guiones de trabajo. Brais dejó en blanco la prueba *Ci03*, y hubo tres alumnos que hicieron lo mismo en *Ci02* y *Ci05*: fueron Diana y (otra vez) Brais. Además, Adela no respondió a *Ci02*, y Benito a *Ci05*.

Según los indicadores *f* y *R*, las pruebas de caracterización de la muestra condujeron a la utilización de casi tantas relaciones de ***Sistemas termodinámicos***, como las actividades de la fase previa, con la excepción de *Ci02* y *Ci05*, en las que los alumnos tuvieron bastantes dificultades para identificar y describir el sistema termodinámico en sus distintos estados. La dispersión de los datos es significativa en todas las pruebas: si se excluyen los datos de *mín* = 0, en *Ci02* se obtiene *mín* = 4; en *Ci03*, *mín* = 22; y en *Ci05*, *mín* = 29. El último valor indica que *Ci05* arrojó resultados de "todo o nada": los alumnos que la realizaron, obtuvieron una eficacia aceptable, pero representan solamente la mitad de la muestra. En las demás pruebas se observa que algunos estudiantes tuvieron dificultades para transferir sus conocimientos a los nuevos fenómenos y contextos, mientras que otros tuvieron un buen desempeño en la utilización de las relaciones de la ciencia escolar.

La activación es menos irregular en *Ci01* y *Ci03*, pruebas que resultaron más fáciles al alumnado.

En el siguiente apartado se discuten estas cuestiones sobre la base de los esquemas idiosincrásicos de los alumnos.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Sistemas termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos que demostraron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de la batería de caracterización inicial.

La *Tabla 41*, siguiendo la clave de símbolos ya explicada, recoge los esquemas de ***Ci***, categorizados en niveles y subniveles que se denominan niveles *i* (i_1, i_2, …, siendo i_1 el esquema más alejado del referencial de la ciencia escolar); los subniveles están rotulados como i_{1a}, i_{1b}, …; i_{2a}, i_{2b}, …; siendo los subniveles *a* los más alejados del referencial dentro de cada nivel. El estudio de la evolución en el aprendizaje se realizó mediante la determinación de las diferencias existentes entre los momentos anteriores y los posteriores (*post-test* y retención) a la aplicación de la propuesta didáctica *Termodinámica Química*.

Para realizar la clasificación de los 8 esquemas idiosincrásicos de la caracterización inicial de la muestra (no se contabilizan los datos de Berta, Diana y Débora, de las que no se dispone de datos), se han comparado los datos correspondientes a las pruebas realizadas con los obtenidos en la fase previa a la investigación. Dado que los ***ER1*** de ***Ci*** se ubican entre los niveles $\boldsymbol{ER2}_{Fp} = p_1$ y $\boldsymbol{ER2}_{Fp} = p_2$, se han establecido solamente dos niveles de ordenación, i_1 e i_2, en orden de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar. A su vez, i_2, que se ha establecido como el nivel más comparable a p_2, está dividido en en dos subniveles, mientras que i_1 contiene cinco subniveles diferentes (ver *Tabla 41*). Los datos de los tres estudiantes que voluntariamente decidieron no participar en las pruebas (bien por no asistir, como es el caso de Débora, o por negarse a entregar los guiones de trabajo, como Carlos y Berta) están situados fuera de esta categorización.

*Tabla 41: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento **ER1**, sistemas termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	p_2		p_1						-		
	p_{2b}	p_{2a}	p_{2e}	p_{2d}		p_{2c}	p_{2b}	p_{2a}			
ALUMNOS	**Ana**	**Darío**	**Adela**	**Clara**	**Alfonso**	**Benito**	**Diana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓			
UNIVERSO consta de ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA tiene MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	✓	✓*	✓	✓*	✓*	✓	*	✓			
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	·	·	·	·	·	·	✖	·			
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	✓			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	✖	·			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	💣	✓	💣	✓	·			
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	·	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	✓	✓	✓	·	·	·	✓	·			
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	✓	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			

A continuación se describen los esquemas ***ER1*** prototípicos de cada nivel de ordenación, y se comentan las características que explican su categorización en los niveles $ER1_{Ci} = [i_1, i_2]$.

Nivel $ER1_{Ci} = i_2$: subniveles $ER1_{Ci} = i_{2b}$ y $ER1_{Ci} = i_{2a}$

Este nivel se compone de dos subniveles, que se describen a continuación:

Subnivel $ER1_{Ci} = p_{2b}$: esquemas ***ER1*** de Ana y Darío

En este nivel se categorizan los dos esquemas de razonamiento más cercanos al referencial, ordenados en dos subniveles que, del más acorde con la ciencia

escolar al más alejado de ella, se rotulan como i_{2b} y i_{2a}. Cada uno de ellos contiene el esquema de un estudiante:

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Ci} = i_{2b}$: esquema ***ER1*** de Ana

Ana activó en ***Ci*** el mismo número de relaciones de la ciencia escolar que en la fase previa. Aparecen 7 nuevas relaciones, y no se activan otras 7 que sí se habían utilizado en las actividades de *Termoquímica*:

No hay alusión a la posibilidad de declarar ***funciones de estado*** para el ***universo***, ni se activan las relaciones sobre los *sistemas aislados*. Tampoco se activa el elemento *composición en fases* y la clasificación de los sistemas en función de ella, y no se aplica el concepto de *temperatura absoluta*. Sin embargo, Ana reconoce que la *temperatura* es una *variable intensiva*, utiliza adecuadamente la *masa* y el *número de mol* como *variables extensivas*, y hace útiles en ***Ci*** las relaciones sobre los *sistemas abiertos* (que no había hecho explícitas en ***Fp***). También recurre más a las descripciones sobre el estado gaseoso.

Identificó el ***sistema termodinámico*** como parte del ***universo*** en contacto con un ***entorno*** que le impone unas ***condiciones***, y clasificó los sistemas en función de sus interacciones con el entorno (con la adjudicación de los valores *sistemas abiertos* y *sistemas cerrados*). El hecho de que no activara el valor *sistema aislado* no implica un menor potencial en los razonamientos alcanzados, porque en las pruebas no se trabaja explícitamente con sistemas aislados.

Ana caracterizó los sistemas utilizando todas las ***funciones de estado*** que se esperaba, en especial la *composición química*, como propiedades de los sistemas que caracterizan el ***estado termodinámico*** (***funciones de estado***). Estableció adecuadamente la naturaleza de las *variables extensivas* e *intensivas* en función de su relación con la *cantidad de materia* del sistema, e hizo útil estas ideas a la hora de formular las ***magnitudes termodinámicas principales*** *energía interna* y *entalpía*. También reconoció la dependencia que tienen éstas con respecto a la temperatura del sistema.

Como ejemplo de las ideas de la ciencia escolar manifestadas por Ana, se transcribe a continuación parte de su respuesta a la prueba *Ci01*, en la cual los alumnos detallaron más la descripción de los estados del sistema:

[Ana, Ci01(1)]: (…) Temos un sistema aberto xa que intercambia materia e enerxía co medio → entorno.

O sistema está formado por un tubo de ensaio con HCl. Tras producirse a reacción co cinc, intercambiase materia e enerxía co entorno. (…)

Aunque hemos considerado que esta alumna activa las relaciones de la ciencia escolar en lo que se refiere a la *composición química* de los sistemas, esto no

quiere decir que Ana tenga suficientes conocimientos sobre la naturaleza de las sustancias químicas y de los cambios que se producen en ella como consecuencia de las reacciones químicas; pero, dentro de sus limitados conocimientos conceptuales sobre estos aspectos, se esfuerza por estudiar la composición química de los sistemas y reconoce que de ésta dependen las magnitudes termodinámicas principales. Eso sí, sus ideas sobre la composición y comportamiento químico de la materia son escasas, y a la hora de describir sistemas materiales como el de la prueba *Ci02*, en el que tiene lugar un proceso redox, se observa que Ana no tiene conocimientos suficientes como para interpretar la reducción del hidrógeno y la oxidación del zinc. Para ella, Zn y Cu reaccionan entre sí en el seno del ¡agua!:

[Ana, Ci02(1)]: (…) Trátase dun sistema formado por unha cuba de auga que contén dous electrodos de Zn e Cu. (…)

Pero, al mismo tiempo, es la única alumna de la muestra que hace explícitas ideas sobre la energía de las partículas como las contribuciones microscópicas a la energía total del sistema. Considera que cada "compuesto" químico tiene una energía interna asociada, y las variaciones de entalpía de red y de formación de una sal iónica dan una idea de:

[Ana, Ci05(1)]: (…) a enerxía que se produce na formación dun mol dun composto. (…)

[Io cual depende de factores como]

- A disolución das moléculas de Cl_2 en átomos.

- A formación de átomos gaseosos a partir do sodio sólido.

- Ionización dos átomos de cloro e sodio. (…)

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Ci} = i_{2a}$: esquema ***ER1*** de Darío

Con respecto a Ana, Darío no hizo explícita en ***Ci*** la idea de que la energía de las partículas determinan la energía total del sistema. Realizó adecuadamente los cálculos de la prueba *Ci05*, pero no respondió de manera cualitativa a la primera cuestión del item *Ci05(1)*; dado que una manipulación algebraica correcta no tiene por qué corresponderse con ideas adecuadas de la ciencia escolar, hemos decidido asignar el *status* de no activada a la relación ***S52***. En el caso de la relación ***S19***, sobre el reconocimiento de los estados de los sistemas termodinámicos, el símbolo 💣 en el esquema ***ER1*** de este alumno señala que confundió los estados inicial y final del sistema en la prueba *Ci03*, en la que declaró como productos de la reacción la cal viva y el agua, y como reactivo la cal apagada:

[Darío, Ci03(2)]: $\Delta H = \Delta H_p - \Delta H_r$

$\Delta H = \Delta H\, CaO + \Delta H\, H_2O - \Delta H\, Ca(OH)_2$

En el apartado dedicado al esquema ***EA2*** se interpreta esta respuesta de Darío, que parece deberse a la necesidad de intercambiar de orden los datos termoquímicos hasta obtener un resultado negativo para la variación de la entalpía del sistema. En todo caso, es posible que esta manipulación irreflexiva oculte una comprensión débil del concepto de estado termodinámico, definido por una serie de cualidades que se pueden cuantificar. Darío hace explícito que cada sustancia química tiene asociada un valor de ΔH, y en *Ci03(1)* demuestra que asocia la cantidad de energía liberada en el proceso a la formación de una determinada cantidad de producto; pero en el *item* siguiente no declara adecuadamente los valores de ΔH_f, lo que le obliga a invertir los estados inicial y final para obtener una variación de entalpía negativa que dé cuenta de la exotermia de la reacción. ¿Tiene claro que los estados inicial y final del sistema se corresponden con reactivos y productos, respectivamente? Es posible, dado que en las demás pruebas los utiliza adecuadamente; pero consideramos que la asignación del símbolo 💣 en la ***S19*** de su esquema ayuda a visualizar la facilidad con la que cambia reactivos por productos cuando le conviene para los cálculos, sin tener en cuenta la necesidad de reflejar la naturaleza de los estados termodinámicos del sistema.

Por lo demás, su ***ER1*** es aceptable para el momento de la intervención en la que puso en juego; hay que tener en cuenta que los esquemas idiosincrásicos ***Ci*** se activaron sin ayuda del experto, así que responden a las tareas que los estudiantes fueron capaces de realizar solos.

Nivel $ER1_{Ci} = i_1$: subniveles $ER1_{Ci} = i_{1e}$, $ER1_{Ci} = i_{1d}$, $ER1_{Ci} = i_{1c}$, $ER1_{Ci} = i_{1b}$ y $ER1_{Ci} = i_{1a}$

En este nivel se incluyen los esquemas de seis de los ocho alumnos de la muestra que respondieron a las pruebas. Comprende cinco subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan de i_{1e} a i_{1a}. El subnivel correspondiente al esquema más incompleto, i_{1a}, está mucho más alejado de las ideas científicas que los demás, pero en todo caso los demás se consideran subniveles de i_1 en lugar de conformar un hipotético nivel superior, porque i_2 es comparable a p_2.

Subnivel $ER1_{Ci} = i_{1e}$: esquema ***ER1*** de Adela

Esta alumna activó bastantes elementos relevantes para resolver las cuestiones planteadas, aunque, como Darío, no utilizó ***S19***. De sus respuestas no se infiere que fuera consciente de que la cantidad de materia no varía durante un proceso químico (***S36***), así que por defecto se le ha asignado el valor de no activado, aunque en ***Fp*** sí había hecho explícita esta relación. Como en las pruebas de caracterización de la muestra los estudiantes no contaban con ayuda del profesor, sus datos proporcionan valiosa información para determinar qué aprendizajes son

suficientemente autónomos en este punto de la intervención, y en consecuencia, para no adulterar esta información, hemos decidido no realizar asignaciones en los esquemas ***Ci*** sobre la base de los esquemas que se activaron en la fase previa. De las respuestas de esta alumna no se infiere la activación de ***S36***, así que consideramos que no figura en sus esquemas iniciales de manera lo suficientemente explícita como para que podamos precisar su papel en ***ER1***.

Adela dejó en blanco el guion de trabajo de la *Ci02*, aunque durante la implementación de las pruebas dedicó bastante tiempo a pensar qué respuesta podía dar; pero las dificultades en la identificación del sistema y el proceso propuestos la hicieron rendirse y borrar las ideas que había anotado. En el aula, exteriorizó varias veces su consternación por no ser capaz de hilar una interpretación coherente. Rodrigo le ayudó a recordar las observaciones que habían realizado durante la experiencia, pero esta evocación no se tradujo en una sistematización de sus ideas que ella juzgara de suficiente calidad como para plasmarlas por escrito. Ya hemos comentado algunos detalles que confirman su afán por disimular la inseguridad en sus conocimientos y no cometer errores en público.

En general, los conocimientos iniciales de Adela sobre los sistemas termodinámicos son aceptables, a pesar de que contienen numerosas ideas alternativas sobre los procesos físicos y químicos, y que su utilización del lenguaje (científico y no científico) no siempre es adecuada. Obsérvese, por ejemplo, la diferencia entre las pruebas *Ci01* y *Ci04* en la utilización del término "exotérmico", que primero considera una característica del sistema, y después, de la reacción química. En las manifestaciones correspondientes a *Ci01* también indican las ideas alternativas de esta alumna sobre los procesos de disolución.

[Adela, Ci01(1)]: Al reaccionar el HCl con el Zn en el tubo de ensayo aumenta la temperatura. (…) Que es un sistema endotermico puesto que en el se libera energía. Además es un sistema abierto, puesto que libera energía y materia.

Al mezclar el HCl con el Zn, lo que observamos es $ZnCl_2$, donde el Zn se disuelve pasando de sólido a liquido. Se libera H_2.

[Adela, Ci04(2)]: Que es una reacción exotérmica porque las ΔH de los productos es < que la ΔH de los reactivos.

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Ci} = i_{1d}$: esquemas ***ER1*** de Clara y Alfonso

Los esquemas de este subnivel pueden compararse con el de Darío, (i_{2a}), con respecto al cual se observa que no se activaron las relaciones ***S46*** y ***S47*** sobre el volumen de los sistemas termodinámicos.

En el esquema de Clara, la relación ***S35*** se ha etiquetado mediante el símbolo 💣 porque esta alumna no utilizó decididamente las nociones de masa y número de

mol. Ya se ha comentado que tenía dificultades relacionadas con los conocimientos del dominio simbólico, y es posible que éstas le hicieran no percatarse del absurdo de que la cantidad de masa que tomó como referencia en *Ci03*, una tonelada de cal viva, generara solamente 74,1 g de producto (masa que corresponde a 1 mol de hidróxido de calcio, como ella misma afirma). Al mismo tiempo, en *Ci01* hacía referencia a la necesidad de controlar la masa del sistema que se estudia:

[Clara, CiO1(1)]: É un proceso exotérmico no que hai que ter en conta variables como a masa do sistema das sustancias, a Tª, P, etc.

En cuanto a Alfonso, su esquema no presenta dificultades relacionadas con ***S35***, pero sus ideas alternativas sobre la compsoición química y el comportamiento de los sistemas materiales repercuten negativamente en su aprendizaje de algunas de las ideas termoquímicas. No reconoció adecuadamente el sistema de *Ci02* (para él, era "a auga"), y puso de manifiesto nuevamente su modelo de estado líquido, alejado de la ciencia escolar, refiriéndose al contenido de la cubetade tres maneras diferentes que para Alfonso son equivalentes: "auga", "ácido" e "disolución"; asocia a estas tres entidades líquidas la acción de "introducir" los dos electrodos. Además, manipuló las ecuaciones matemáticas de *Ci03(2)* hacer cuadrar los datos correspondientes a los distintos estados del sistema.

De todas maneras, es evidente que desde el principio de la fase previa hasta este momento de la intervención, Alfonso realizó un proceso de aprendizaje que modificó sustancialmente sus ideas hacia las de la ciencia escolar:

[Alfonso, CiO1(1)]: Poderíase considerar o tubo como un sistema aberto, ca que intercambia materia e enerxía co exterior. Enerxía en forma de calor, xa que o tubo se quenta e materia polos gases desprendidos. É un proceso a presión constante xa que no tubo a presión é a mesma no interior que no exterior.

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Ci} = i_{1c}$: esquema ***ER1*** de Benito

Resulta llamativo que Benito, bastante proclive a utilizar ideas del dominio microscópico al principio de la intervención, no hizo alusión a la naturaleza corpuscular de la materia en la caracterización inicial de la muestra, a diferencia de sus compañeros de los subniveles y el nivel superiores (***S04***, ***S05*** y ***S08*** no activadas). Quizá por ello tampoco activara las relaciones sobre el volumen de los sistemas.

Dado que las respuestas a estas pruebas se elaboraban de manera individual, es de esperar que en ellas no influyeran negativamente los comentarios jocosos que hacía Brais sobre la *obstinación* de Benito en justificar sus interpretaciones apelando a las interacciones químicas; parece, pues, que en este caso no utilizó sus conocimientos de los modelos de la Química por no sentirse seguro de ellos. Sus respuestas son menos detalladas que en la fase previa, aunque contienen algunos

rasgos que indican la necesidad que sentía este alumno por detallar sus observaciones y explicaciones. Por ejemplo, es el único que alude a la inflamabilidad del hidrógeno en *Ci01*, y su interpretación del proceso redox de *Ci02* es la más completa en cuanto a la descripción de los fenómenos eléctricos:

[Benito, Ci02(1)]: (…) Cando introducimos os dous electrodos e cerramos o circuito, o polímetro marca unha corrente de 0'9 V. (…)

Tampoco tenía claro qué relación de masa y número de moles había que utilizar en *Ci03(1)*, y aprovechó un momento en que el profesor atendía a Ana, para preguntar a Alfonso, mediante gestos, qué dato de masa se necesitaba para los cálculos. Alfonso comprobó que Rodrigo no estuviera vigilando y, en silencio, le pasó su guion de trabajo para que Benito copiara la respuesta. Por este motivo, hemos optado por simbolizar con un 💣 la relación ***S35*** del ***ER1*** de Benito, para dar a entender que este alumno no acabó de cuantificar adecuadamente la masa y el número de mol de los sistemas químicos como magnitudes que dan cuenta de la cantidad de materia de los mismos, a pesar de que consideraba que cada compuesto químico tiene una cantidad de energía asociada a su formación o degradación; así pues, que podría tener algunas dudas sobre la naturaleza extensiva de la masa o el número de mol (aunque no las manifestó en ***Fp*** o en otras pruebas de ***Ci***); en todo caso, estas dudas parecen limitarse a sistemas termodinámicos complejos o sobre los que tuviese que realizar cálculos en los que no hubiera desarrollado un buen nivel de habilidad.

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Ci} = i_{1b}$: esquema ***ER1*** de Diana

Con respecto a Benito, Diana no utilizó explícitamente la distinción de los sistemas cerrados con respecto a los abiertos, y no hizo referencia a la naturaleza extensiva de las magnitudes termodinámicas básicas. En sus cálculos de *Ci03(2)*, intercambió, copiando a Darío, los datos de los reactivos y los productos. Cuando, en un momento, el profesor pasó a su lado y le preguntó si había identificado qué sustancias intervenían en la reacción, Diana se limitó a señalar con el bolígrafo su respuesta, diciendo "éstos y éstos".

Su falta de continuidad en el estudio se observa en las siguientes manifestaciones, en las que clasifica de manera inadecuada el sistema en función de las fases presentes, que ella considera "sustancias" diferentes:

[Diana, Ci01(1)]: (…) Ademais é un sistema heteroxéneo xa que non se distinguen dúas substancias na reacción. (…)

Es la única alumna de los once que hace referencia a esta clasificación; los demás utilizaron el concepto de estado de agregación y solamente distinguieron las fases del sistema en función de los estados presentes.

Subnivel $\boldsymbol{ER1}_{Ci} = i_{1a}$: esquema ***ER1*** de Brais

Este subnivel está significativamente más alejado de la ciencia escolar que los demás; de hecho, Brais activó poco más de la mitad de relaciones que sus compañeros. Solamente respondió a las pruebas *Ci01* y *Ci04*. A pesar de ello, su esquema ***ER1*** no presenta relaciones inadecuadas, porque este alumno se limitó a responder las actividades en una extensión en la que estaba seguro de sus conocimientos; si dominaba más relaciones conceptuales sobre la identificación y descripción de los sistemas termodinámicos y sus estados, los investigadores no tienen constancia de ello. La activación de 21 de 59 relaciones se considera claramente insuficiente para el nivel de 2º de Bachillerato y en comparación con los esquemas que articularon los demás alumnos de la muestra.

Como muestra de sus ideas, se transcribe su respuesta a *Ci01*:

[Brais, Ci01(1)]: Ao botar a granalla ~~e o zinc~~ de zinc e HCl empeza a burbullear e despréndese un gas, o H_2O e isto sábese porque ao achegar a chama dun misto á boca do tubo de ensaio prodúcese unha pequena explosión.

Trátase dun sistema aberto porque intercambia materia e enerxía co entorno.

Esquema *ER2: procesos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en las pruebas de caracterización inicial.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 42* recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER2*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron en la caracterización inicial de la muestra. La *Tabla 42* indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***P***.

Tabla 42: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** *(**ER2**), extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	31	*P01*
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	21	*P02*
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	2	*P03*
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	7	*P04*
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	26	*P05*
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	2	*P06*
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	2	*P07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	0	*P08*
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	7	*P09*

ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	0	*P10*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	2	*P11*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	0	*P12*
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	0	*P13*
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	0	*P14*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	7	*P15*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	7	*P16*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	10	*P17*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	31	*P18*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	8	*P19*
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	13	*P20*
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	0	*P21*
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	0	*P22*
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	2	*P23*
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	0	*P24*
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	6	*P25*
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*P26*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	1	*P27*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	0	*P28*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	0	*P29*
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	0	*P30*
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	0	*P31*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	0	*P32*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	6	*P33*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	5	*P34*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	0	*P35*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	*P36*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*P37*
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	25	*P38*
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	13	*P39*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	0	*P40*
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	16	*P41*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	2	*P42*
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	2	*P43*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	0	*P44*
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	0	*P45*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	0	*P46*
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	0	*P47*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	1	*P48*
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	1	*P49*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	0	*P50*
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	0	*P51*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	0	*P52*
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	0	*P53*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	5	*P54*
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	5	*P55*
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	0	*P56*
CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P57*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	26	*P58*
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	26	*P59*
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	2	*P60*
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	*P61*

Del referencial ***procesos termodinámicos***, los estudiantes activaron 32, frente a las 51 utilizadas en la fase previa. Nuevamente, las relaciones de mayor frecuencia se refieren al reconocimiento de las *reacciones químicas* como ***procesos termodinámicos*** que tienen lugar en los ***sistemas materiales***, así como a las ***condiciones*** en que tienen lugar dichos procesos y a las ***transferencias de energía*** implicadas. Los estudiantes demostraron algunas dificultades en la conceptualización del *calor* como un proceso por el que los sistemas materiales intercambian con su entorno una cantidad de energía debido a la diferencia de temperatura con el entorno. En cuanto al *trabajo*, aunque se citaba explícitamente en

el planteamiento de la prueba *Ci02*, apenas tuvo acogida como proceso de transferencia de energía, y ningún alumno lo relacionó con la variación de presión o con un cambio de volumen del sistema.

No se activaron las relaciones mediante las que se completa el significado del ***camino termodinámico*** mediante la activación del elemento *estados intermedios*, ni la realización de *procesos cíclicos*, que en Química no son frecuentes y cuya explicitación no se pedía en las pruebas. Prácticamente no clasificaron los procesos en función de las condiciones en las que suceden.

La frecuencia de activación asociada a las relaciones macroscópicas de ***ER2*** es $f_{(macro)}$ **= 286**, con un promedio de activación bajo: $\bar{x}_{(macro)}$ **= 5**, y una desviación típica elevada ($\sigma_{(macro)}$ **= 9**). De estos datos se infiere que los ***ER2*** iniciales de los alumnos permiten construir de manera autónoma descripciones bastante limitadas de los procesos físicos y químicos. En comparación con la fase previa, las relaciones que tienen más éxito en ***Ci*** son la definición de los procesos químicos, el estudio de los mismos por etapas y la interpretación de las transferencias de materia (dos de las pruebas plantean procesos químicos en los que se involucra la liberación de un gas); sin embargo, no se produce la activación de relaciones nuevas en ***Ci***, a diferencia de lo que sucedió con el esquema ***ER1***. A la vista de los resultados, se puede afirmar que la intervención sirvió para ayudar a los alumnos a construir razonamientos basados en el estudio comparativo de diferentes estados del sistema y en su cuantificación mediante las magnitudes termodinámicas, pero no a elaborar descripciones detalladas de los procesos físicos y químicos. Es cierto que los estudiantes no se sentían muy seguros de sus conocimientos y rehuían la redacción de respuestas largas, que les obligarían a invertir más tiempo y esfuerzo; pero precisamente porque les costaba resolver las cuestiones en un tiempo razonable, se les permitió que completaran las pruebas en casa, y ninguno de ellos realizó cambios en sus manifestaciones escritas. ¿Se trata de una prueba de transparencia en la autoevaluación, de desgana o de pereza? También es posible que esperaran a la sesión siguiente para probar si obtenían ayuda por parte del profesor.

En cuanto a las relaciones microscópicas, nuevamente activaron tres de ellas, con una frecuencia $f_{(micro)}$ **= 34**, y $\bar{x}_{(micro)}$ **= 7**. La desviación típica también es muy elevada, $\sigma_{(micro)}$ **= 11**, lo que confirma que el nivel inicial de conocimiento de los estudiantes en lo que respecta a los modelos de la Química era en general bajo, y que no todos consiguieron acercar sus ideas a la ciencia escolar en un grado que se pueda considerar aceptable para 2º de Bachillerato.

De las 24 relaciones ya conocidas de cursos anteriores, las frecuencias de activación f y los correspondientes promedios de activación confirman esta interpretación: $f_{(no\ nuevas)}$ **= 220**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 9** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 11**; frente a los valores $f_{(nuevas)}$ **= 100**, $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 3** y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 6**. Así pues, los alumnos construyeron descripciones muy escuetas

sobre los procesos termodinámicos, y no utilizaron buena parte de las relaciones que se habían trabajado durante el desarrollo de la unidad didáctica *Termoquímica*. Recuérdese que en varias ocasiones, a lo largo de la fase previa, se habían tenido que rescatar ideas de la ciencia escolar que ya deberían estar aprendidas desde varios cursos antes, pero no se recordaban, y que se tuvieron que superar bastantes dificultades para activar todas estas relaciones que en teoría deberían ya manejar con soltura.

La media de activación por alumno y actividad o prueba para ***ER2***, tal como se ha calculado antes para ***ER1*** (*Tabla 39*), muestra que en ***Ci*** solamente fueron seis las relaciones que se activaron más que en ***Fp***: la división de los procesos en ***etapas***, la declaración de *transferencias de materia*, y la diferencia entre los ***procesos físicos*** y los ***procesos químicos***. En las demás relaciones, las diferencias de activación son favorables a la fase previa, aunque solamente dos sobrepasan ligeramente el valor 0,3: la definición de ***calor*** y la cuantificación de las ***transferencias de energía*** mediante la *variación de energía interna* del sistema. Estos datos indican que los alumnos no llegaron a utilizar en la misma medida las relaciones de ***ER2*** sin ayuda del profesor, y se observa una caída significativa de la activación: 16 relaciones de las utilizadas en la fase previa no aparecen en los esquemas ***ER2*** de ***Ci***.

En la *Tabla 43* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***procesos termodinámicos***, para cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra.

Tabla 43: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Procesos termodinámicos (ER2)*** *en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	95	8	19	(3,17)
Ci02	27	5	8	(1,7)
Ci03	85	7	14	(0,14)
Ci04	61	8	15	(0,14)
Ci05	52	5	12	(0,11)

Recuérdese que se presentaron 10 de los 11 alumnos, pero fueron 8 los que entregaron los guiones de trabajo. Brais dejó en blanco la prueba *Ci03*, y hubo tres alumnos que hicieron lo mismo en *Ci02* y *Ci05*: fueron Diana y (otra vez) Brais. Además, Adela no respondió a *Ci02*, y Benito a *Ci05*.

Solamente en dos de las pruebas, los ocho estudiantes activaron relaciones de ***ER2***. Las duplas cubren intervalos tan amplios, porque los esquemas que demostró Brais en la caracterización inicial son bastante fragmentarios. Pero todos los valores son en general bajos.

Como sucedió en la fase previa, los datos de la *Tabla 43* son significativamente inferiores a los de la *Tabla 40*, tanto en los valores de *f* como en los de *R*, porque los alumnos tendieron a utilizar muy pocas relaciones de tipo descriptivo o clasificativo (*Análisis mediante competencias*, pág. 951). Sin embargo, a diferencia de lo que sucedía en ***Fp***, no se observa que dieran prioridad en sus razonamientos a las relaciones que permiten describir distintos estados del sistema frente a las que describen los procesos físicos y químicos en sí (***ER3***). De hecho, los datos de ***ER2*** y ***ER3*** son muy similares, lo que indica que los alumnos tendieron a compaginar la descripción de los procesos con una reconstrucción de sus características a partir de los cambios ocurridos entre los estados inicial y final del sistema, pero da la impresión de que ambas perspectivas, aunque más integradas que en las actividades de *Termoquímica*, se combinaron precisamente para elaborar respuestas lo más breves posible.

Solamente se observa un claro descenso en los valores de *f* para *Ci02*, que fue, como ya hemos indicado, la prueba de mayor dificultad para el alumnado. No se observa una tendencia clara a activar menos relaciones en las últimas pruebas, a pesar de que la última resulta también conceptual y procedimentalmente demandante. Así pues, la componente actitudinal no afectó a unas tareas o cuestiones problemáticas más que a otras, y las pruebas más difíciles no suscitaron un efecto de rechazo, aunque en el aula se observó que algunos de los estudiantes (Adela y Clara, ésta última desanimada por las bajas calificaciones del examen tradicional) demostraban en público su impaciencia o desaliento por considerar que las pruebas *Ci02*, *Ci03* y *C05* eran difíciles.

Los valores de *f* y *R* no apuntan hacia una prueba que condujera a una mayor activación de relaciones de ***Procesos termodinámicos***, sino que *Ci01* y *Ci03* (a pesar de que ésta disgustara tanto a Adela y Clara) comparten el valor *max*. Estos datos sugieren que las tareas de tipo interpretativo-cualitativo que tenían alguna conexión con las actividades realizadas en la fase previa, promovieron en los estudiantes la utilización de sus esquemas ***ER2*** para dar respuesta a las cuestiones. Es cierto que estas pruebas, precisamente por su vínculo con otras tareas ya realizadas, ofrecían menor dificultad en cuanto a la transferencia de conocimientos a situaciones y contextos nuevos. Pero hay que matizar esta afirmación: en primer lugar, estas pruebas hacen referencia a conocimientos conceptuales y procedimentales que se habían trabajado el principio o medio de del desarrollo de *Termoquímica* (dentro de lo que era posible para no dejar fuera de la batería la determinación de conocimientos relevantes en los esquemas de razonamiento y de acción); en segundo lugar, los alumnos, a pesar de disponer de todo un fin de semana para revisar sus guiones de trabajo de *Termoquímica* y utilizarlos como material de consulta para completar las respuestas a dichas pruebas, no lo hicieron; así que las ideas que utilizaron para resolver la batería de caracterización revelan con bastante fidelidad la zona de desarrollo real de los individuos de la muestra. En

cierto sentido, esto garantiza que las actividades de la secuencia didáctica ensayada fueron útiles en la construcción de relaciones de la ciencia escolar, aunque quedaría para más adelante verificar cuáles estos aprendizajes se demostrarían estables en un plazo de tiempo más largo.

En resumen, los alumnos focalizaron su interés en analizar lo que resultaba más fácil y útil para ellos, que era describir al mínimo los estados de los sistemas e interpretar los procesos objeto de estudio mediante la comparación de los estados inicial y final del sistema utilizando las variaciones de las variables termodinámicas.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***ER2***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Procesos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de razonamiento idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la *Tabla 44*.

Los niveles *i* de ordenación de los ***ER2*** idiosincrásicos son tres, de i_1^* a i_3^* (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar); la razón de etiquetarlos con un asterisco se debe a la comparación con los niveles $\boldsymbol{ER2}_{Fp}$ (correspondientes a la fase previa), en la que se observa que incluso el nivel más alto de activación del ***ER2*** en ***Ci*** es inferior al más bajo de ***Fp***, lo que hace que ambos grupos de esquemas no sean equiparables. Se han establecido dos subdivisiones para los niveles i_1^*, y tres para i_2^* y i_3^* (ver *Tabla 44*).

Tabla 44: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER2***, ***Procesos termodinámicos***, *idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	i_3^*			i_2^*			i_1^*		-		
	i_{3c}^*	i_{3b}^*	i_{3a}^*	i_{2c}^*	i_{2b}^*	i_{2a}^*	i_{1b}^*	i_{1a}^*			
ALUMNOS	**Darío**	**Ana**	**Alfonso**	**Clara**	**Adela**	**Benito**	**Diana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	✓	✓	✓	✓	·	✓	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	✓	✓	✓	✓	·	✓	·	·			
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	✓	✓	·	·	·	·	·	·			

CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	💣	✓	💣	✓	✓	💣	·	·			
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	✓	·	✓	·	·	·	·	·			
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	·	✓	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	·	✓	✓	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	✓	·	✓	·	·	·	·	·			
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	✓	·	✓	·	·	·	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	·	·	✓	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	·	·	✓	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	✓	✓	✓	✓	💣	·	✖	·			
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	💣	·	✖	·			
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	·	·	·	·	·	·	·	·			

CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	·	✓	✖	✓	·	·	·	·			
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	✖			

A continuación se describen los esquemas ***ER2*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = [i_1^*, \ldots, i_3^*]$.

Nivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = \boldsymbol{i_3^*}$: subniveles $\boldsymbol{i_{3c}^*}$, $\boldsymbol{i_{3b}^*}$ y $\boldsymbol{i_{3a}^*}$

En el nivel más acorde con el referencial de la ciencia escolar, se encuentran tres esquemas ***ER2***, en los que se activaron los elementos más relevantes para resolver de manera rápida las cuestiones planteadas: sin apenas describir la dinámica de los procesos (sucesión de estados termodinámicos), ni clasificar los mismos atendiendo a sus características, ni profundizar en las implicaciones que tienen en las transferencias de energía las condiciones a las que está sometido el sistema. Los tres subniveles en los que se divide este nivel son los siguientes:

Subnivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = i_{3c}^*$: esquema de Darío

Todas las relaciones que Darío no demostró en el ***ER2*** correspondiente a las pruebas de caracterización inicial, estaban activadas en su esquema de la fase previa. Este esquema de razonamiento es fundamentalmente descriptivo, y Darío procuró escribir respuestas lo más breves posible. En su afán por abreviar, llegó incluso a dejar indicado qué variables del sistema se *deberían* estudiar:

[Darío, Ci01(1)]: (…) Nun proceso termodinámico hay que ter en conta variables como a P (que neste caso podese decir que e constante), tamén debemos de ter en conta o V, a masa, etc…

Todavía se manifestaron sus dificultades con la conceptualización del calor como proceso de transferencia energética. La expresión "energía en forma de calor" indica que Darío mantenía un conflicto conceptual entre el modelo alternativo de las *formas de energía* y el modelo de la ciencia escolar, aunque para uniformizar su expresión sobre las interacciones entre el sistema y el entorno escribió que en el proceso químico de *Ci01* se intercambia materia "en forma de $H_{2\,(g)}$".

Subnivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = i_{3b}^*$: esquema de Ana

La principal diferencia con respecto al esquema de Darío es que Ana no activó las relaciones que se refieren a las condiciones de presión constante. Utilizó la nomenclatura científica para indicar que los valores de variación de entalpía se refieren al estado estándar, pero consideramos que este rasgo no es suficiente para asignar el *status* de activado a las ideas de la ciencia escolar sobre la invariancia de la presión en las reacciones químicas habituales, porque la manipulación de símbolos no implica necesariamente la comprensión conceptual, y, en este caso, Ana podría

haber memorizado de manera poco reflexiva las fórmulas sobre la variación de entalpía sin conocer qué significa el superíndice ^{0}.

Ana fue la única alumna de la muestra que reconoció la naturaleza del trabajo. Además, no manifestó dudas sobre la del calor, por lo que inferimos que interiorizó las ideas básicas de la ciencia escolar sobre las transferencias de energía:

[Ana, CiO1(1)]: (…) Cando achegamos unha chama á boca do tubo de ensaio prodúcese unha combustión e libérase enerxía por un proceso de calor.

[Ana, CiO1(2)]: (…) Cando se conectan, mediante un proceso de traballo obtense enerxía.

También reconocía las disoluciones como procesos químicos, idea que solamente ella y Clara defendieron de manera adecuada.

Subnivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = i^*_{3a}$: esquema de Alfonso

La descripción que realiza Alfonso sobre los procesos termodinámicos como eventos que suceden en los sistemas y consisten en una evolución entre un estado inicial y un estado final no llega a incluir la noción de ***camino termodinámico*** más que en lo que respecta a establecer el sentido de evolución que marca el proceso. Sí reconoció que los sistemas pueden transferir materia y/o energía con su entorno, superó totalmente la visión alternativa del calor como una forma de energía relacionada con la diferencia de temperatura: "enerxía en forma de calor, xa que o tubo se quenta" (en su respuesta a *Ci01*). No reconoció explícitamente el trabajo como proceso de transferencia energética (por ejemplo, en *Ci02* habla solamente de "enerxía" e, indistintamente, "electricidade"), y sus respuestas a las tres últimas pruebas no dejan claro que reconociera que la variación de entalpía ayuda a cuantificar las transferencias de energía. En *Ci03* parece no ser consciente de que el extraordinario aumento de temperatura de la bodega, asociado a los aspectos energéticos de la reacción química, tiene consecuencias catastróficas; se limita a manifestar que la cal viva "é un material corrosivo".

Sin embargo, es el único alumno que clasifica un proceso en función de las condiciones en las que sucede:

[Alfonso, CiO1(1)]: (…) É un proceso a presión constante xa que no tubo a presión é a mesma no interior que no exterior. (…)

Sus dificultades con el modelo de estado de agregación líquido continuaban, y para él el Zn "desaparece" en el ácido clorhídrico al mezclarse con él.

Nivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = \boldsymbol{i^*_2}$: subniveles $\boldsymbol{i^*_{2c}}$, $\boldsymbol{i^*_{2b}}$ y $\boldsymbol{i^*_{2a}}$

Este nivel contiene tres esquemas ***ER2***, cada uno en un subnivel diferente:

Subnivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = i^*_{2c}$: esquema de Clara

Con respecto al esquema de Alfonso, en el de Clara no figuran las relaciones sobre las condiciones de presión constante. Como Darío, esta alumna considera que es importante controlar una serie de variables del sistema, pero en ninguna prueba llega a exteriorizar su intención efectiva de estudiar estas magnitudes:

[Clara, Ci01(1)]: É un proceso exotérmico no que hai que ter en conta variable como a masa do sistema das sustancias, a Tª, P, etc. (…)

Como Ana y Darío, reconoce la utilidad de la variación de entalpía en la determinación de la energía transferida por calor en un proceso, aunque en *Ci03(2)* desista de calcularla después de no haber sido capaz de determinar el aumento de temperatura que sucede en la bodega del barco, en *Ci03(1)*. Respondió esta cuestión a lápiz, para poder borrar los cálculos si cometía algún error, y después de llegar a un resultado de temperatura final, éste le pareció absurdo, porque ella consideraba que la temperatura del sistema tenía que aumentar "mucho", y comunicó su extrañeza a Rodrigo. Cuando el profesor le recomendó que se centrara en recordar de qué depende la cantidad de energía intercambiada por calor, Clara reflexionó un rato, borró sus cálculos y comenzó de nuevo. Para no interferir en el trabajo de los estudiantes, la investigadora se mantenía a cierta distancia de ellos y nno pudo acceder a los primeros cálculos de Clara; sí a los definitivos, que ella volvió a dar por absurdos, aunque los mantuvo, a falta de una respuesta mejor. De todos modos, dejó patente su impresión de que:

[Clara, Fp03(1)]: ~~cando a cal reacciona coa auga~~ ó reaccionar a cal viva coa auga prodúcese un proceso moi exotérmico. (…)

Subnivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = i_{2b}^{*}$: esquema de Adela

Con respecto al esquema de Clara, el de Adela presenta tres relaciones no activadas, y algunas en cuyo establecimiento se verifican dificultades:

Adela no hizo explícito que hay *estados intermedios* comprendidos entre los *estados inicial y final* del sistema, y que la sucesión de estados termodinámicos constituye el ***camino termodinámico***. Tampoco había construido el concepto de disolución, proceso que seguía considerando como un cambio de estado:

[Adela, Fp03(1)]: (…) Al mezclar el HCl con el Zn, lo que observamos es $ZnCl_2$, donde el Zn se disuelve pasando de sólido a liquido. (…)

Subnivel $\boldsymbol{ER2}_{Ci} = i_{2a}^{*}$: esquema de Benito

Este alumno no activó la distinción de los procesos físicos con respecto a los procesos químicos, y no hizo ninguna alusión a los procesos de disolución. Además, manifestó nuevamente la idea alternativa del calor como forma de energía asociada a la variación de temperatura; sus ideas a este respecto son muy similares a las de Darío, e incluyen la expresión de las transferencias de materia "en forma de" una determinada sustancia química:

[Benito, Fp01(1)]: (…) É un sistema aberto, xa que a reacción intercambia materia en forma de hidróxeno co entorno, e intercambia enerxía en forma de calor que libera a reacción. (…)

De sus respuestas escritas no se infiere claramente que hubiera construido el significado de la variación de entalpía como cuantificador de la energía intercambiada por calor en los procesos (a presión constante). En ***Fp*** sí la había hecho explícita, pero las manifestaciones escritas correspondientes a ***Ci*** son más inseguras, por lo que hemos optado por no realizar la asignación ausente del *status* de relación activada para ***P34***.

Nivel $ER2_{Ci}$ = i_1^*: subniveles i_{1b}^* y i_{1a}^*

En el nivel más alejado de la ciencia escolar están los esquemas de Diana y Brais, que son los más incompletos de la muestra en este punto de la intervención.

Subnivel $ER2_{Ci}$ = i_{1b}^*: esquema de Diana

El esquema de esta alumna revela que tenía unos conocimientos superficiales sobre las transferencias de energía. Parecía bastante insegura de sus ideas y evitaba en lo posible desarrollarlas, con lo que no queda claro que fuera capaz de distinguir la cuantificación de los intercambios energéticos mediante la variación de la energía interna (total de energía intercambiada) y la variación de la entalpía (energía intercambiada por calor a presión constante), ni cuál era en aquel momento su concepto de calor. Aunque a lo largo de la fase previa había hecho evolucionar sus ideas hacia la ciencia escolar, hacia el final de la misma aún se encontraba en pleno conflicto conceptual, y la falta de pruebas en sus manifestaciones escritas de ***Ci*** nos impiden afirmar que sostuviera las ideas de la ciencia escolar.

Sus respuestas no entran en detalles sobre la naturaleza y condiciones de los procesos (aunque considera que éstos dependen "de varios factores como a d, T, V, nº de moles, etc."), así que tampoco refleja la idea de sucesión de estados termodinámicos intermedios entre un estado inicial y un estado final del sistema.

Subnivel $ER2_{Ci}$ = i_{1a}^*: esquema de Brais

Poco hay que comentar del ***ER2*** de Brais, esquema que solamente contiene 4 relaciones de la ciencia escolar. Las respuestas de este alumno son tan parcas que ya se han descrito suficientemente en *Análisis item a item* (pág. 847).

Esquema *ER3: aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos en las pruebas de caracterización inicial de la muestra.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 45* recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER3*** de los alumnos, con las correspondientes frecuencias de activación *f* y los códigos ***Cód*** mediante los que se describen las relaciones del esquema, representadas por el símbolo ***A***.

Tabla 45: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3)****, extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	6	***A01***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	0	***A02***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	29	***A03***
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	7	***A04***
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	0	***A05***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	0	***A06***
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	0	***A07***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	29	***A08***
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	***A09***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	0	***A10***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	***A11***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	30	***A12***
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	26	***A13***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	***A14***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	30	***A15***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	14	***A16***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	14	***A17***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	0	***A18***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	5	***A19***
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	5	***A20***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	30	***A21***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	25	***A22***
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	25	***A23***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	17	***A24***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	6	***A25***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	5	***A26***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	17	***A27***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	***A28***
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	0	***A29***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	0	***A30***
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	0	***A31***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	0	***A32***
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A33***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	0	***A34***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	0	***A35***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	0	***A36***
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	0	***A37***
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A38***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	0	***A39***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A40***
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	0	***A41***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A42***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	0	***A43***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	0	***A44***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	0	***A45***

CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	0	***A46***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	0	***A47***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A48***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	0	***A49***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO ($dG < 0$)	0	***A50***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" ($dG = 0$)	0	***A51***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO ($dG > 0$)	0	***A52***

De las 52 relaciones que componen el esquema referencial de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, los alumnos activaron 16, frente a las 27 de la fase previa. Dado que en ***ER3*** hay 25 relaciones sobre la espontaneidad e irreversibilidad de los procesos termodinámicos que no se esperaba activar en este momento de la intervención, hay 9 relaciones que sería deseable que se hubieran utilizado, y no fue así: no se activaron el concepto de *endotermia*, ni la variación de presión, ni las ideas sobre los aspectos energéticos asociados a la ruptura y formación de interacciones químicas.

Las relaciones de mayor frecuencia son, como en ***Fp***, las que se refieren a la conexión entre el sentido del proceso y la evolución del sistema, al balance energético del sistema como consecuencia del proceso termodinámico, y a la caracterización de éste utilizando las variaciones de las magnitudes termodinámicas; con especial frecuencia se activaron las relaciones que tienen que ver con las transferencias energéticas y su cuantificación mediante las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales variación de energía interna y variación de entalpía.

Las 48 relaciones macroscópicas tienen $f_{(macro)} = 320$, con un promedio $\bar{x}_{(macro)} = 7$ y una elevada desviación típica, aunque este dato era de esperar, dado el elevado número de relaciones de la Termodinámica Química ($\sigma_{(macro)} = 11$). El promedio de activación indica un resultado mediocre. En cuanto a los datos de las relaciones microscópicas, la frecuencia de activación es nula: ningún alumno hizo referencia a los aspectos microscópicos de las rupturas y formaciones de enlaces químicos. Estas ideas de la ciencia escolar se trabajaron solamente en las dos últimas actividades de la fase previa, y debe recordarse que los estudiantes solamente demostraban conocer modelos simples de partículas, sin atreverse a entrar en detalles sobre las interacciones químicas.

A pesar de todo, las 8 relaciones de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** que eran conocidas de cursos anteriores, tienen un resultado que indica mejorías en los esquemas de razonamiento idiosincrásicos: $f_{(no\ nuevas)} = 44$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 6$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 6$; y $f_{(nuevas)} = 276$, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)} = 6$, y $\sigma_{(nuevas)} = 11$. Queda claro que, aunque en una extensión insuficiente para el nivel de 2º de

Bachillerato, los estudiantes de la muestra utilizaron las relaciones nuevas más que las ya conocidas para construir sus descripciones e interpretaciones sobre los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos. Esto demuestra la efectividad de la metodología ensayada para activar relaciones conceptuales sobre la caracterización de los procesos termodinámicos, a través de los cambios que suceden en las magnitudes termodinámicas básicas y principales, asociadas a los balances energéticos entre el sistema y el entorno.

Para estudiar solamente los datos de los alumnos que entregaron los guiones de trabajo, y eliminar la influencia de los resultados nulos de Carlos, Berta y Débora, se estima la media de activación por alumno y actividad o prueba. Si se comparan las medias de ***Ci*** y ***Fp***, se obtienen los siguientes resultados:

La activación media de relaciones de ***ER3*** por alumno y prueba es favorable, en casi todas las relaciones a la fase previa, salvo para ***A01*** (sobre la variable *tiempo*) y ***A27*** (definición de la *entalpía de enlace*); pero las diferencias de activación no sobrepasan el valor 0,3. En resumen, en ***Ci*** no se activaron las relaciones de ***ER3*** en la misma medida que en ***Fp*** (donde los alumnos contaban con la ayuda del profesor), así que parte del esquema ***ER3*** se encuentra todavía en el nivel de desarrollo potencial.

En la *Tabla 46* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, para cada una de las 5 pruebas de caracterización inicial.

Tabla 46: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3)*** *en cada una de las 5 pruebas de* ***Ci***

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	90	8	13	(10,13)
Ci02	26	5	12	(0,7)
Ci03	87	7	15	(0,15)
Ci04	66	8	12	(0,12)
Ci05	51	5	13	(0,13)

De los 10 alumnos presentados a las pruebas, 8 entregaron los guiones de trabajo. Adela no respondió a *Ci02*, Benito a *Ci05*, Diana a ambas, y Brais dejó en blanco también *Ci03*. Los valores *mín* = 0 de las cuatro últimas pruebas se deben a que Brais no activó en ellas relaciones de ***ER3***. Su respuesta a *Ci04(1)* se limita al ajuste de las ecuaciones químicas necesarias para resolver la primera cuestión, y no escribió respuesta a *Ci04(2)*. Pero aunque se ignoren los valores de activación de este alumno, el valor *min* sigue siendo nulo en *Ci02* (Adela, Diana y Clara no activaron relaciones de ***ER3*** en estas pruebas) *Ci04* (a causa de los resultados de Diana) y *Ci05* (Diana y Benito). La elevada dispersión de los datos indica que la dicotomización de la muestra que se observó en ***Fp*** tiene componentes conceptual, procedimental y actitudinal: en Carlos, Berta y Débora, los obstáculos más evidentes al aprendizaje

son los actitudinales, y en Brais y Diana, además se detectan dificultades para extraer información relevante de los enunciados de las pruebas y transferir sus conocimientos para dar respuesta a cuestiones problemáticas. En concreto, hasta este punto del análisis se reafirma que realizaron un aprendizaje bastante pobre de las principales relaciones conceptuales termoquímicas, y que no tuvieron éxito en aplicar la estrategia de reconstruir los aspectos dinámicos de los procesos a partir del análisis comparativo de los estados del sistema. En sus compañeros, los logros son relativos: no son aceptables para el nivel de 2º de Bachillerato, pero considerando que en este momento de la intervención los estudiantes sólo ponían en juego modelos embrionarios de partículas y enlace químico, y que no habían construido un modelo de reacción química aplicable a las características globales del proceso, no es de extrañar que los esquemas ***ER3*** iniciales sean incipientes. Interesa comprobar hasta qué punto se pueden aprovechar para trabajar en lo sucesivo en las ZDP de los alumnos y estructurar el nuevo conocimiento sobre la base del ya existente.

Al comparar los datos de esta tabla con los que se recogen en las correspondientes a ***ER2*** (*Tabla 43*), se observa que los valores de *f* son prácticamente iguales para uno y otro esquema. Las *R* y las duplas (*mín,max*) también son similares para ambos, lo que confirma que la metodología ensayada fue tan útil en la elaboración de interpretaciones dinámicas sobre los procesos termodinámicos, como en la descripción de los mismos.

De nuevo, la prueba *Ci02* muestra unos indicadores *f*, *R* y *(mín,máx)* de ***ER3*** más bajos que las demás, debido a la dificultades que se presentaron para interpretar el proceso redox. Las frecuencias de activación más elevadas se corresponden con *Ci01* y *Ci03* (las pruebas más significativas para los alumnos); pero los valores de *R* son similares en todas las pruebas salvo *Ci02*. Estos datos parecen indicar que los alumnos cuyos esquemas ***ER3*** son más completos, transfirieron con éxito sus conocimientos a la interpretación de nuevos fenómenos e contextos distintos… salvo que el proceso objeto de estudio resulte muy poco conocido, en cuyo caso se observan dificultades para elaborar razonamientos justificativos que expliquen las observaciones experimentales. La ayuda del profesor en tareas como las que se plantean en *Ci02* es crucial, para que los alumnos superen sus problemas en la transferencia de unos conocimientos que son todavía lo suficientemente escasos y fragmentarios como para no permitirles relacionar el nivel observacional con el interpretativo, a pesar de que otorgaban importancia a las ideas científicas que tratan los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos.

En el siguiente apartado se discuten estas cuestiones sobre la base de los esquemas idiosincrásicos de los alumnos.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, se elaboraron los ***ER3*** idiosincrásicos de los alumnos, que después se clasificaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la *Tabla 47*.

Los niveles *i* de ordenación de los ***ER3*** idiosincrásicos son tres, de i_1^* a i_3^* (de menor a mayor coincidencia con el referencial); como sucedió con los niveles $\boldsymbol{ER2}_{Ci}$, la comparación de los $\boldsymbol{ER3}_{Ci}$ con los $\boldsymbol{ER3}_{Fp}$ muestra que ambos grupos de esquemas no son equiparables, así que los $\boldsymbol{ER3}_{Ci}$ se etiquetan con un asterisco. Se han establecido dos subdivisiones para los tres niveles (ver *Tabla 47*).

*Tabla 47: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento **ER3**, **Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos**, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	i_3^*			i_2^*		i_1^*			-		
	i_{3b}^*		i_{3a}^*	i_{2b}^*	i_{2a}^*	i_{1b}^*		i_{1a}^*			
ALUMNOS	**Adela**	**Darío**	**Ana**	**Clara**	**Alfonso**	**Benito**	**Diana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	✓	✓	·	✓	✓	✓	✓	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	·	✓	·	·	·			
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	·	✓	·	·	·			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			

VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO (dG < 0)	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" (dG = 0)	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO (dG > 0)	·	·	·	·	·	·	·	·			

A continuación se describen los esquemas ***ER3*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{ER3}_{Ci} = [i_1^*, \ldots, i_3^*]$.

Nivel $\boldsymbol{ER3}_{Ci} = \boldsymbol{i_3^*}$: subniveles $\boldsymbol{i_{3b}^*}$ y $\boldsymbol{i_{3a}^*}$

En el nivel más acorde con el referencial de la ciencia escolar, se encuentran los esquemas ***ER3*** de tres alumnos, dos de los cuales también se encontraban en el nivel máximo de ***ER2***: Darío y Ana.

Subnivel $\boldsymbol{ER3}_{Ci} = i_{3b}^*$: esquemas de Adela y Darío

Los esquemas de estos dos alumnos son idénticos entre sí, y contienen las principales relaciones de la ciencia escolar sobre la variación de entalpía como cuantificador de las transferencias energéticas de las reacciones químicas, aunque no hacen referencia a la necesidad de que éstas tengan lugar en condiciones de presión constante. En cuanto a otras variaciones de las magnitudes termodinámicas, reconocen que los procesos termodinámicos, que suceden en un sentido marcado

por los estados inicial y final del sistema, conllevan cambios en las variables del sistema. Trabajan adecuadamente con los cambios de temperatura y de volumen, y reconocen que los procesos químicos traen consigo cambios en la energía (variación de energía interna). Son capaces de realizar de manera autónoma el balance macroscópico de los intercambios energéticos entre el sistema y el entorno, y aunque en principio en las actividades solamente se trabaja con procesos exotérmicos (más conocidos para ellos), demuestran un manejo de las ecuaciones termoquímicas que apunta hacia una distinción adecuada entre la exotermia y la endotermia; sin embargo, hemos optado por no activar la relación ***A5***, porque no es prudente realizar asignaciones de valores ausentes en un esquema incipiente como éste, cuando los alumnos se están familiarizando con la naturaleza ontológica y epistemológica del conocimiento y todavía se expresan de tal manera que resulta difícil verificar si dominan las ideas de la ciencia escolar a este respecto. Por ejemplo, Adela es capaz de reconocer una reacción química exotérmica:

[Adela, Ci04(2)]: (…) Que es una reacción exotérmica porque las ∆H de los productos es < que la ∆H de los reactivos en este caso es decir se desprende mas calor en los productos que en los reactivos. (…)

En su respuesta se observa que esta alumna asocia, de acuerdo con las ideas científicas, la liberación de energía por calor en un proceso (la reacción de formación de una sustancia química) con la propiedad de exotermia, y ésta con el signo de la variación de entalpía del sistema. Pero en la primera prueba escribía:

[Adela, Ci01(1)]: (…) Que es un sistema endotermico puesto que en el se libera energía. (…)

Esta respuesta parece poner en evidencia la incipiente consolidación de las ideas y la terminología de la ciencia escolar. A medida que Adela elaboraba descripciones e intepretaciones, iba evocado los nuevos conocimientos y el lenguaje científico necesario para expresarlos. Creemos que conocía el significado de la palabra "endotérmico" y que su respuesta a *Ci01* contiene solamente un *lapsus linguae* y no un auténtico conflicto conceptual sobre los intercambios energéticos de los procesos químicos, pero dado que en un primer momento no la utiliza el término "endotermi" adecuadamente y no vuelve a citarlo, hemos decidido no incluir en su esquema inicial la relación ***A10***.

Subnivel $\boldsymbol{ER3}_{Ci} = i^*_{3a}$: esquema de Ana

La única diferencia entre el ***ER3*** de esta alumna y los de sus compañeros de nivel es que ella no activó la magnitud *tiempo del proceso*. Sus observaciones son desordenadas, y es evidente que responden a la necesidad de recordar por orden las ideas clave recogidas en sus apuntes escritos y no a un estudio sistemático de los cambios sucedidos en los sistemas; por esta razón no hemos incluido ***A1*** en su esquema inicial.

Nivel $ER3_{Ci} = i_2^*$: subniveles i_{2b}^* y i_{2a}^*

Este nivel consta de los esquemas ***ER3*** de dos alumnos.

Subnivel $ER3_{Ci} = i_{2b}^*$: esquema de Clara

El ***ER3*** de Clara no incluye las relaciones sobre la variación de volumen que experimentan los sistemas termodinámicos.

Subnivel $ER3_{Ci} = i_{2a}^*$: esquema de Alfonso

Aunque el esquema de Alfonso tiene el mismo número de relaciones que el de Ana, hay una gran diferencia en la importancia de la idea que no expresan con respecto a sus compañeros:

Ana no estructura sus observaciones de manera cronológica y no describe la duración del proceso, y esto no resta demasiada potencialidad interpretativa a su ***ER3***. Por ello, su esquema se categoriza dentro del nivel más cercano a las ideas de la ciencia escolar. Pero Alfonso no relaciona la variación de entalpía de un sistema con la liberación o absorción de energía por calor al medio (recuérdese que un aumento de temperatura de 930 ºC no le hace reflexionar sobre la exotermia de la reacción de *Ci03* ni la necesidad de vincularla a la variación de entalpía). Sin embargo, parece considerar que la variación de entalpía sirve como estimador de los intercambios energéticos microscópicos, lo cual no implica que asocie estos mecanismos con el balance global macroscópico de la reacción.

Nivel $ER3_{Ci} = i_1^*$: subniveles i_{1b}^* y i_{1a}^*

El nivel más alejado de la ciencia escolar contiene los esquemas ***ER3*** de los tres alumnos que menos énfasis hacen en la dinámica de los procesos químicos, hasta el punto de no reconocer la utilidad de la variación de entalpía para cuantificar los balances macroscópicos de energía de una reacción, ni la conveniencia de relacionar la variación de entalpía con los mecanismos microscópicos de ruptura y formación de enlaces químicos, con la finalidad de estimar el sentido de los intercambios energéticos entre el sistema y su entorno.

Subnivel $ER3_{Ci} = i_{1b}^*$: esquemas de Benito y Diana

Además, estos dos alumnos no de no detallaron las variaciones de volumen del sistema, a pesar de que dos de las pruebas presentan reacciones químicas en las que se produce un gas. Sus ideas sobre la variación de entalpía incluyen el reconocimiento de ésta (como el cambio en la entalpía del sistema), y su asociación con la estabilidad de los compuestos químicos. A la vista de estas ideas, es probable que Benito y Diana sostengan un modelo de espontaneidad de los procesos químicos basado en la minimización de la energía del sistema, pero con las pruebas realizadas no llega para confirmar esta suposición. En el ***Capítulo V*** (ver ***Volumen B2***) se discuten las ideas de los estudiantes sobre estos aspectos termodinámicos avanzados.

Subnivel $ER3_{Ci} = i^*_{1a}$: esquema de Brais

El esquema ***ER3*** de este alumno solamente contiene 10 relaciones, y es tan incipiente que no incluye ninguna idea sobre la magnitud termodinámica entalpía. Brais reconoce que los procesos termodinámicos implican cambios en la energía interna de los sistemas, pero no va más allá en su interpretación sobre los aspectos energéticos, que para él no parecen tener relación con los cambios en la temperatura; tampoco utiliza las demás magnitudes termodinámicas.

Esquema ER4: Dinámica de los procesos químicos

Se presentan los esquemas de razonamiento de *Dinámica de los procesos químicos* que desarrollaron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 48* recoge las variables, los subesquemas y las relaciones que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento *Dinámica de los procesos químicos* de los alumnos, y se indica la frecuencia de activación ***f*** y el código ***Cód*** de identificación las relaciones de ***ER4***, representadas por el símbolo ***D***.

*Tabla 48: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento **Dinámica de los procesos químicos** (**ER4**), extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	30	*D01*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	30	*D02*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	29	*D03*
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	16	*D04*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	16	*D05*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	16	*D06*
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	0	*D07*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	0	*D08*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	30	*D09*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	16	*D10*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D11*
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D12*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	16	*D13*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	0	*D14*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	16	*D15*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	16	*D16*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D17*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D18*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	0	*D19*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA	0	*D20*

TERMODINÁMICA		
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D21*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D22*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D23*
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D24*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D25*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D26*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D27*
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	0	*D28*
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	0	*D29*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D30*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	7	*D31*
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D32*
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D33*
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	0	*D34*
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D35*
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D36*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	0	*D37*
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D38*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	0	*D39*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	0	*D40*
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	0	*D41*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	0	*D42*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	0	*D43*

De las 43 relaciones que componen el esquema referencial, los alumnos de la muestra activaron 12, es decir, aproximadamente la mitad que en la fase previa. Pero las relaciones de mayor frecuencia son las mismas que entonces, lo que nos permite hacer dos afirmaciones sobre el aprendizaje realizado durante el proceso de cambio metodológico: los alumnos aceptaron las principales ideas de la ciencia escolar sobre la naturaleza de la Termoquímica y de sus enunciados (las leyes de la Termoquímica y los principios de la Termodinámica), y ciñeron sus razonamientos al ámbito de la Termodinámica Clásica, sin utilizar constructos de las demás disciplinas de la Dinámica (con la excepción de Brais, activan una única relación sobre la Cinética Química).

Se esperaba la no activación de las 6 relaciones microscópicas de representación del conocimiento. Para las 37 relaciones macroscópicas se obtienen los valores $f_{(macro)}$ **= 238**, con promedio de activación bajo $\bar{x}_{(macro)}$ **= 6** y una desviación típica elevada $\sigma_{(macro)}$ **= 10**. Sin embargo, estos datos no indican una activación deficiente del esquema, porque la mitad de las relaciones de ***ER4*** pertenecen al ámbito de la Termodinámica Química. En cuanto a las 3 relaciones de *Dinámica de los procesos químicos* ya conocidas para los estudiantes, los parámetros de activación son $f_{(no\ nuevas)}$ **= 7**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 2** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 4**. Los resultados de las 40 relaciones nuevas son: $f_{(nuevas)}$ **= 231**, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 6**, y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 10**. En comparación con los resultados de ***Fp***, la activación de los ***ER4*** en ***Ci*** se puede calificar de escasa. Las respuestas de los alumnos no contienen las suficientes

relaciones de la ciencia escolar como para considerar que puedan, en este momento de la intervención, ampliar de manera autónoma sus ideas sobre la naturaleza de la Termodinámica como disciplina de la Química.

Para eliminar la influencia de sus datos de la muestra, se calcula la media de activación por alumno y actividad o prueba, y se comparan las medias de ***Ci*** y ***Fp***. Las únicas relaciones en las que la activación media de relaciones de ***ER4*** por alumno y prueba es favorable a la caracterización inicial, son ***S05***, ***S06*** y ***S15*** (sobre las ***leyes de la Termoquímica***), además de ***S31*** (el reconocimiento de la ***Cinética Química*** como parte de la ***Dinámica de los procesos físicos y químicos***); pero las diferencias de activación favorables a la fase previa no sobrepasan en ningún caso el valor 0,2, y hay pocas relaciones que se activaran en ***Fp*** y no reaparecieran en ***Ci***. Así pues, los alumnos tendieron a activar las relaciones de ***ER4*** sin ayuda del profesor casi tanto como con ella, y podemos inferir que la adquisición de este esquema de la ciencia escolar progresa rápido.

En la *Tabla 49* se recoge información sobre la activación de las relaciones de *Dinámica de los procesos químicos*, para cada una de las 5 pruebas de la caracterización inicial.

Tabla 49: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Dinámica de los procesos químicos*** *(****ER4****) en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	39	8	5	(3,5)
Ci02	15	5	4	(0,4)
Ci03	63	7	11	(0,11)
Ci04	66	8	11	(0,11)
Ci05	55	5	11	(0,11)

Se presentaron a las pruebas todos los alumnos, salvo Débora, pero solamente 8 entregaron los guiones de trabajo. Brais dejó en blanco las pruebas *Ci02*, *Ci03* y *Ci05*; Diana, *Ci02* y *Ci05*; Adela, *Ci02*, y Benito *Ci05*.

Como en la fase previa, la activación de ***Dinámica de los procesos químicos*** es inferior a la de ***ER1***, ***ER2*** y ***ER3***. De nuevo, la constancia en la activación de las últimas actividades revela que los estudiantes centraron sus esfuerzos en trabajar con los conceptos y procedimientos que permiten estudiar los intercambios energéticos, que habían consolidado en el último tramo de la secuencia didáctica ensayada.

Los amplios intervalos que cubren las duplas *(mín,máx)* se deben a la dicotomización de la muestra. Los valores máximos de las duplas coinciden en todas las pruebas con el número total *R* de relaciones activadas, y los esquemas de acción de todos, salvo Brais, han activado las mismas 12 relaciones. Así pues, los resultados indican que las actividades de *Termoquímica* tuvieron un discreto éxito en

su conjunto en la evolución de los esquemas iniciales del alumnado sobre la Dinámica de los procesos físicos y químicos. Ya se ha comentado que los alumnos partían de un bajo nivel de conocimientos científicos y sobre la Ciencia, y que se enfrentaron a bastantes dificultades en el aprendizaje de conceptos y procedimientos. En la caracterización inicial, demostraron que utilizaban de manera autónoma aproximadamente la mitad de las relaciones deseables para este momento de la interevención. El resultado más positivo está en la homogeineidad alcanzada: salvo Brais, que tiene unos resultados pésimos en todos los ***ER***s, construyeron una concepción básica de la Dinámica de los procesos físicos y químicos como disciplina científica.

La interpretación conjunta de los valores de *f* y *R* aporta información interesante sobre la puesta en juego de los conocimientos por parte del alumnado:

Las frecuencias de activación mayores se corresponden con las tres últimas pruebas, mientras que *Ci01* (que promovió mejores esquemas ***ER1***, ***ER2*** y ***ER3***) no muestra tanto éxito para ***ER4***. Las ***R*** de *Ci03*, *Ci04* y *Ci05* son también superiores a las de las dos primeras pruebas, y el valor de *Ci01* y *Ci02* casi coinciden, aunque la frecuencia es el doble para aquélla que para ésta. Este perfil de activación revela que, en las primeras respuestas, a los alumnos les costó recuperar de su memoria las ideas sobre la Ciencia y transferirlas a la resolución de cuestiones problemáticas. Después de las primeras dudas, la realización de tareas con un perfil procedimental ayudó a repasar las normas del conocimiento científico y los fundamentos de los enunciados termoquímicos, y la activación de ***ER4*** mejoró significativamente.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Dinámica de los procesos químicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER4***, categorizados en los niveles y subniveles de la *Tabla 50*.

Se ha establecido un solo nivel *i* de ordenación de los ***ER4*** idiosincrásicos, al que llamamos i_1, dividido en dos niveles (ver *Tabla 50*). Aunque el número de relaciones de $\boldsymbol{ER4_{Ci}} = i_1$ es ligeramente inferior al de $\boldsymbol{ER4_{Fp}} = p_1$,

Tabla 50: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER4***, ***Dinámica de los procesos químicos***, *idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	i_{1b}							i_{1a}	-		
ALUMNOS	**Ana**	**Alfonso**	**Benito**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			

LEYES DE LA TERMOQUÍMICA											
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			

EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			

A continuación se describen los esquemas ***ER4***$_{Ci}$ = p_1 idiosincrásicos, organizados en los subniveles i_{1b} (más acorde con la ciencia escolar) e i_{1a}.

Subnivel ***ER4***$_{Ci}$ = i_{1b}: esquemas ***ER4*** de Ana, Alfonso, Benito, Adela, Diana, Clara y Darío

Los siete alumnos del nivel p_1 activaron la definición de la Termodinámica de los procesos físicos y químicos y de la Cinética Química. Dentro de la primera, distinguieron la Termoquímica de la Termodinámica Química. Además, utilizaron con éxito los enunciados de las dos leyes de la Termoquímica para transformar los datos de variación de entalpía y obtener resultados sobre los balances macroscópicos de los intercambios energéticos entre los sistemas y su entorno. Además, reconocieron los fundamentos del primer principio de la Termodinámica.

Sin embargo, no utilizaron en sus respuestas el concepto de equilibrio térmico, así que no activaron el ***principio cero***. Las respuestas escritas que se ofrecen a continuación ejemplifican las ideas de la ciencia escolar que demostraron los alumnos del subnivel i_{1b}:

[Ana, Ci04(1)]: (…) A ΔH_f axudan a calcular a ΔH_c porque utilizando a variación de entalpía de formación dos compostos que interveñen na reacción polo número de moles que hai, pódese calcular a ΔHc. (…)

$CH_{4\,(g)} + 2O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)} + 2H_2O_{(l)}$

$\Delta H_c(CH_4) = \Delta H^\circ_f\,(CO_2) + 2\Delta H^\circ_f\,(H_2O) - \Delta H^\circ_f\,(CH_4)$ (…)

[Adela, Ci04(1)]: (…) Mediante la ley de Hess.

$CH_4 \rightarrow C + 2H_2$

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

$2\,(H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O)$

$\Delta H_{combustión} = -\Delta H_a + \Delta H_b + 2\Delta H_c$ (…)

[Benito, Fp04(1)]: (…) Porque a enerxía que libera un composto ó degradarse ou a que absorbe ó formarse son sempre a mesma. (…)

[Darío, Fp05(1)]: (…) $\Delta H_f = \Delta H_s + \Delta H_{EI} + \frac{1}{2}\Delta H_D + \Delta H_{AE} + U$

$-441 = 109 + 495 + 121 - 348 + U$

U = -818 KJ/mol

Subnivel $ER4_{Ci} = i_{1a}$: esquema ***ER4*** de Brais

Brais no activó las relaciones correspondientes a las leyes de la Termoquímica y al primer principio de la Termodinámica

Esquema *ER5*: *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento de ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 51* recoge las variables, junto con los subesquemas y sus relaciones, que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento ***ER5*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las pruebas de caracterización inicial. En la *Tabla 51* se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones del esquema ***aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos*** están representadas por el símbolo ***M***.

Tabla 51: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5)****, extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M01*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	0	*M02*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	0	*M03*
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	0	*M04*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M05*
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M06*
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	0	*M07*
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M08*
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	0	*M09*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	0	*M10*
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	0	*M11*
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	0	*M12*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M13*
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M14*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	0	*M15*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M16*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M17*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M18*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	0	*M19*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	0	*M20*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	0	*M21*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	0	*M22*
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M23*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	0	*M24*
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	0	*M25*
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	0	*M26*

REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	*M27*
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	0	*M28*
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	0	*M29*

Como se ve en la *Tabla 51*, los alumnos no utilizaron ninguna de las relaciones del esquema ***ER5*** en sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial (en la fase previa habían utilizado 8). Ya se ha comentado que sus conocimientos iniciales sobre los modelos de la Química eran insuficientes para el nivel de 2º de Bachillerato, con modelos de enlace y estructura muy fragmentarios e ideas poco adecuadas sobre la naturaleza física o química de los cambios que experimentan los sistemas materiales. La vinculación entre las rupturas y formaciones de enlaces químicos y la variación de entalpía y de energía interna del sistema no se activaron, de lo que se infiere que la metodología ensayada no tuvo éxito en la integración de los aspectos macroscópicos y microscópicos. A lo largo de la fase previa se observó un cierto progreso, aunque irregular, en las ideas microscópicas construidas, y se logró que, a pesar de los escasos conocimientos de partida, los estudiantes se atrevieran a expresar sus ideas sobre las partículas y las interacciones químicas. Pero cuando se trata de transferir estas nociones a nuevas situaciones y contextos sin la ayuda manifesta del profesor, los alumnos preferían omitir toda referencia al dominio microscópico, considerando que toda idea alejada de la ciencia escolar representaría una tacha en la evaluación de sus conocimientos.

Del esquema ***ER5***, pues, no hay más información que comentar. En cuanto a las relaciones microscópicas contenidas en los demás esquemas de razonamiento, se realiza a continuación un estudio comparativo que ayuda a analizar la profundidad interpretativa que se alcanzó en la construcción de los modelos de la Química, aunque sin los resultados de la *Tabla 52* ya queda claro, con lo expuesto hasta este momento, que en el conjunto del macroesquema de razonamiento ***ERT*** (***Termoquímica y Termodinámica Química***) no se articularon modelos de partículas, enlace químico y reacción química que se puedan considerar adecuadamente articulados y completos desde el punto de vista de la ciencia escolar.

*Tabla 52: resumen de los principales datos de activación de las relaciones microscópicas de los esquemas de razonamiento **ER1**, **ER2**, **ER3** y **ER4** y **ER5**, junto con el macroesquema **ERT**, en las pruebas de caracterización inicial de la muestra*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*ER1*	*ER2*	*ER3*	*ER4*	*ER5*	*ERT*
$\mathbf{f_{(micro)}}$	185	34	0	0	0	219
$\mathbf{\bar{x}_{(micro)}}$	11	7	0	0	0	4
$\mathbf{\sigma_{(micro)}}$	10	11	0	0	0	8

De las interpretaciones realizadas en los apartados anteriores y de los datos contenidos en la *Tabla 52*, se extraen las siguientes conclusiones sobre la activación de relaciones microscópicas durante la fase previa:

Las frecuencias de activación *f* correspondientes a los distintos ***ER***s dan una idea de la escasa incorporación de los modelos microscópicos para la interpretación de los procesos termodinámicos. De hecho, la *f* asociada a tres esquemas de razonamiento es nula, y las de ***ER1*** y ***ER2*** son bastante bajas. La construcción de conocimientos sobre los aspectos energéticos asociados a los cambios que suceden en los sistemas no se vio acompañado por una integración de los modelos científicos que dan cuenta de los procesos desde el punto de vista de los enlaces químicos, y en cuanto a los modelos de estructura corpuscular de la materia, los alumnos tuvieron dificultades para hacer explícitas ideas sobre la composición y el comportamiento de los sistemas. En cuanto a la elaboración de descripciones e interpretaciones sobre los procesos físicos y químicos, las ideas alternativas dominaban los esquemas iniciales de los estudiantes, como ejemplifican las siguientes manifestaciones escritas:

[Alfonso, Ci01(1)]: (…) O HCl e o Zn reaccionan ó mesturarse e desaparece o Zn. Despois de esperar a que se produza a reacción observase que o tubo está quente. (…)

[Brais, Ci01(1)]: (…) Ao botar a granalla ~~e o zinc~~ de zinc e HCl empeza a burbullear e despréndese un gas, o H_2O e isto sábese porque ao achegar a chama dun misto á boca do tubo de ensaio prodúcese unha pequena explosión. (…)

[Adela, Ci01(1)]: (…) Al mezclar el HCl con el Zn, lo que observamos es $ZnCl_2$, donde el Zn se disuelve pasando de sólido a liquido. Se libera H_2. (…)

[Diana, Ci01(1)]: (…) Ó meter nun tubo de ensaio HCl (líquido) e unha granalla de cinc, a reacción produce un cambio de temperatura que tamén podemos interpretar ó observar como burbullea o sistema. (…)

[Ana, Ci02(1)]: (…) Ó introducir os dous electrodos no sistema que é a auga, e reacciona o Zn e o Cu o que fai que se desprenda enerxía. (…)

[Benito, Ci02(1)]: (…) A que o Cu coa electricidade reacciona coa auga liberando hidróxeno. (…)

Sin embargo, estos alumnos eran capaces de trabajar con el ajuste de ecuaciones químicas y con el diseño de ciclos termoquímicos relativamente complejos con los que estaban familiarizados, como el ciclo de Born-Haber. Estos resultados reafirman la asignación por defecto del *status* de no activadas para aquellas relaciones que los alumnos utilizaron de manera únicamente simbólica y sin el desarrollo de algoritmos en los que demostraran una comprensión conceptual que los llevara a discutir los resultados numéricos o a manipularlos de tal manera que quedara clara la intención de interpretar los datos termoquímicos de acuerdo con las ideas de la ciencia escolar.

IV.3.2.2. Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción *EA1, …, EA4*

Los cuatro apartados que vienen a continuación están dedicados a la descripción de los esquemas de acción ***EA1*** (*Esquema* ***EA1****: Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*, pág. 919), ***EA2*** (*Esquema* ***EA2****: Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*, pág. 928), ***EA3*** (*Esquema* ***EA3****: Representación gráfica de aspectos termodinámicos*, pág. 936) y ***EA4*** (*Esquema* ***EA3****: Representación gráfica de aspectos termodinámicos*, pág. 936) que activaron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra.

Advertimos al lector que, en este capítulo, la discusión de los ***EA***s apenas se ilustra con ejemplos de las respuestas del alumnado, porque en el apígrafe dedicado al análisis *item* a *item* ya se han descrito las principales destrezas y estrategias que utilizaron los alumnos a la hora de elaborar sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial de la muestra. Remitimos a las páginas concretas del análisis para la consulta de la información sobre estos aspectos del aprendizaje demostrado.

Esquema *EA1*: *Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial de la muestra.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 53* recoge las variables, subesquemas y relaciones de los esquemas de acción ***EA1*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas en la caracterización inicial. En la *Tabla 53* se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***EA1***, representadas por el símbolo ***I***.

*Tabla 53: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (**EA1**), extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	31	*I01*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	33	*I02*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	30	*I03*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	31	*I04*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	30	*I05*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS	30	*I06*

MAGNITUDES TERMODINÁMICAS		
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	14	*I07*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	18	*I08*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	26	*I09*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	25	*I10*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	17	*I11*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	0	*I12*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	0	*I13*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	30	*I14*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	14	*I15*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	0	*I16*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	5	*I17*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	25	*I18*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	17	*I19*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*I20*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	0	*I21*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	13	*I22*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	13	*I23*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	13	*I24*
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	13	*I25*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	0	*I26*
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	0	*I27*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	6	*I28*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	6	*I29*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	0	*I30*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	31	*I31*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	7	*I32*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	7	*I33*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	16	*I34*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	16	*I35*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	16	*I36*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	0	*I37*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	1	*I38*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*I39*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	27	*I40*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	31	*I41*

El esquema referencial de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** se compone de 41 relaciones, y los datos muestran que los estudiantes activaron 31 en la caracterización inicial, frente a las 35 de la fase previa. Nuevamente, como era de esperar, las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la identificación de los ***procesos termodinámicos*** que tienen lugar en los

sistemas termodinámicos propuestos, así como al reconocimiento de que la ***identificación y la descripción de los aspectos termodinámicos*** se realiza mediante el reconocimiento, el control y la exclusión de las magnitudes termodinámicas, para las cuales realizan un ***establecimiento de significados***. Comparando las frecuencias de activación de las relaciones sobre el control y la exclusión de las variables termodinámicas principales, con las correspondientes al control y exclusión de las variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas, se halla que la utilización autónoma de ΔU (relación ***I18***) y ΔH (***I19***) es comparable a la de ΔT, Δp y ΔV (***I15***, ***I16***,***I17***). Las cuatro relaciones que se activaron en la fase previa pero no en ***Ci*** tienen que ver con el significado de la variación de presión (***I16***, ***I26*** e ***I27***), y con el vínculo entre el *primer principio de la termodinámica* y el *calor* (***I37***); la marcada preferencia hacia el análisis del trabajo en detrimento del calor, que se había detectado en la secuencia de actividades sobre *Termoquímica* (ver ***Capítulo III***), apenas aparece, y la relación ***I39*** solamente se activó una vez. Parece que el aprendizaje sobre la variación de entalpía revalorizó para los estudiantes el concepto de calor, al tiempo que el de trabajo tendía a relegarse, por generar efectos menos evidentes en las reacciones químicas y no estar cuantificado por la variación de una magnitud termodinámica principal cuyo signo permita clasificar los procesos físicos o químicos en función del sentido de las transferencias energéticas.

Atendiendo a la novedad de las relaciones, los parámetros de activación son: frecuencia $f_{(no\ nuevas)} = 447$, con promedio $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 19$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 12$; y $f_{(nuevas)} = 145$, con $\bar{x}_{(nuevas)} = 9$ y $\sigma_{(nuevas)} = 9$. Estos valores son sustancialmente menores que los de la fase previa, y permiten inferir que las descripciones de los procesos termodinámicos se basaron fundamentalmente en los conocimientos procedimentales aprendidos en cursos pasados. Estos datos son consistentes con los que se discutieron en el ***Capítulo III***: los estudiantes se sentían más seguros elaborando razonamientos interpretativos y poniendo en juego destrezas de acción en los que se involucraran las magnitudes que más conocían, pero la construcción de las ideas de la Termoquímica fue aceptable, dadas las condiciones de partida y el hecho de que las desviaciones típicas $\sigma_{(no\ nuevas)}$ y $\sigma_{(nuevas)}$ no difieren tanto entre sí, a pesar de la no activación de las relaciones sobre la entropía y la energía de Gibbs; además, en las pruebas de caracterización de la muestra los alumnos elaboraron sus respuestas de manera individual, sin contar con ayudas significativas de sus compañeros y del profesor.

Algunos datos indican la efectividad de la metodología ensayada en la promoción de destrezas y estrategias de resolución de cuestiones en Ciencias: la relación ***I42***, mediante la que se establece el contraste de hipótesis como una de las acciones fundamentales del trabajo científico, se activa más en ***Ci*** que en ***Fp***, así como el reconocimiento de las magnitudes presión y energía interna, y la

representación de las leyes de la Termoquímica mediante las variaciones de entalpía del sistema.

En la *Tabla 54* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, para cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial.

Tabla 54: activación de las relaciones del esquema de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** *(**EA1**) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	150	8	21	(13,21)
Ci02	53	5	13	(0,12)
Ci03	184	7	30	(0,30)
Ci04	116	8	21	(0,21)
Ci05	89	5	19	(0,19)

Recuérdese que se presentaron 10 de los 11 alumnos, pero fueron 8 los que entregaron los guiones de trabajo. Brais dejó en blanco la prueba *Ci03*, y hubo tres alumnos que hicieron lo mismo en *Ci02* y *Ci05*: fueron Diana y (otra vez) Brais. Además, Adela no respondió a *Ci02*, y Benito a *Ci05*.

Según los valores de *f* y *R*, las pruebas que condujeron a una mayor utilización de ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** son *Ci03* (con diferencia) y *Ci01*, que tienen un perfil cualitativo. En número de relaciones activadas, *Ci04* iguala a *Ci01*, porque exige la combinación de diferentes destrezas para responder a tres tareas: la justificación de las leyes de la Termoquímica, la obtención de resultado numéricos que relacionen la energía por calor puesta en juego en varias reacciones emparentadas, y la realización de un diagrama entálpico para representar las transferencias energéticas involucradas en la combustión de un hidrocarburo. La dispersión de los datos se debe, como se indicó en los apartados de análisis de los esquemas de razonamiento, a las respuestas casi nulas de Brais y las renuncias puntuales de Diana o Benito a responder a una prueba concreta. Los máximos de las duplas *(mín,máx)* casi alcanzan los valores que se obtuvieron en las actividades de la fase previa, cuando los alumnos contaban con la ayuda de sus compañeros y el profesor. De estos resultados se infiere que la metodología ensayada ayudó a la mayoría de los alumnos a alcanzar una buena eficacia en la identificación y descripción de los aspectos relevantes de los procesos termodinámicos. La consolidación de destrezas que se observó en las últimas actividades de la secuencia didáctica *Termoquímica* se mantiene (valores de *R* similares), aunque las frecuencias de activación caen, en parte por el menor número de alumnos que responden a las pruebas, y en parte por la brevedad de las respuestas.

La comparación de los datos de activación de este ***EA*** con los de ***ER2*** aporta más información, porque ambos esquemas tienen un perfil descriptivo. Se observa que la prueba *Ci02* ofreció dificultades a los alumnos en cuanto a la identificación de las principales características del proceso químico redox (***ER2***), y estas dificultades conceptuales se tradujeron en problemas para la ejecución de acciones útiles en la transferencia de las ideas de la ciencia escolar a la descripción del proceso (***EA1***). Por el contrario, *Ci03* fue muy fructífera en la activación de ambos esquemas (en un nivel comparable al que demostraban los estudiantes cuando respondían actividades con apoyo de sus compañeros y el profesor), y el caso de *Ci05* es un ejemplo de dificultades para transferir conocimientos conceptuales que se han aprendido (***ER2*** aceptables) utilizando destrezas y estrategias de alto nivel (***EA1*** más incompletos). Se trata de una prueba en la que los alumnos fueron capaces de establecer un planteamiento básico de las acciones encaminadas a la realización de las tareas que se les pedían, pero tuvieron dificultades en la integración de lo conceptual y lo procedimental, debido al nivel de abstracción que tiene la realización de un diagrama con múltiples estados de interés que se relacionan entre sí mediante procesos de naturaleza muy diferente: cambios de estado de agregación, reacciones de disociación, ionizaciones, formación de una red iónica, etc. Los alumnos fueron, en general, capaces de poner nombre a estos procesos y representarlos mediante el ciclo de Born-Haber (con el que ya habían trabajado previamente), pero la necesidad de plasmar tantos estados del sistema en un único diagrama los abrumó.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA1***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

Sobre la base del referencial ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la *Tabla 55*.

Los niveles *i* de ordenación de los ***EA1*** idiosincrásicos son tres, son tres, de i_1^* a i_3^* (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar); se señalan con un asterisco para indicar que el nivel más alto de activación del $\boldsymbol{EA2}_{Ci}$ es inferior al más bajo de ***Fp***, así que ambos grupos de esquemas no son equiparables. Se han establecido tres subdivisiones en i_3^* (ver *Tabla 55*).

*Tabla 55: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción **EA1**, Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	i_3^*			i_2^*	i_1^*	-
	i_{3c}^*	i_{3b}^*	i_{3a}^*			

ALUMNOS	Ana	Adela	Darío	Alfonso	Clara	Benito	Diana	Brais	Carlos	Berta	Débora
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / el calor	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

A continuación se describen los esquemas ***EA1*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{EA1}_{Ci} = [i_1^*, \ldots, i_3^*]$.

Nivel $EA2_{Ci} = i_3^*$: subniveles i_{3c}^*, i_{3b}^* e i_{3a}^*

Este nivel comprende los tres subniveles que, ordenados del más acorde con la ciencia escolar al más alejado de ella, se rotulan como i_{3c}^*, i_{3b}^* y i_{3a}^*.

Subnivel $\boldsymbol{EA1}_{Ci} = i_{3c}^*$: esquema de Ana

Esta alumna activó los elementos más relevantes para la resolución de las cuestiones planteadas, exceptuando el reconocimiento de la variación de presión, la relación inversa entre presión y volumen y la vinculación del calor con el primer principio de la Termodinámica. Sus respuestas revelan que al finalizar la fase previa dominaba las principales destrezas y estrategias de la ciencia escolar en cuanto a la definición y la descripción de los sistemas materiales utilizando las magnitudes termodinámicas, y que las ideas alternativas que exteriorizó se debían a problemas de tipo conceptual. Por ejemplo, en *Ci03* sabía que había que determinar la diferencia entre los valores inicial y final de la temperatura de la bodega, pero a la hora de calcularla no eligió la operación adecuada. Ya hemos indicado en el ***Capítulo III*** que las respuestas iniciales de estos estudiantes (no sólo de Ana) están salpicadas de numerosos errores de cálculo relacionados con una mala aplicación de las operaciones matemáticas básicas y con una conceptualización de los números alejada de las ideas deseables; se trata de dificultades de aprendizaje que se remontan a los cursos de la ESO (en algún caso, incluso a Primaria) y que se

producían a escasos meses de las PAAU. Es un éxito de la metodología ensayada el haber logrado que un grupo de estudiantes con este tipo de dificultades llegara a utilizar de manera autónoma algunas destrezas y estrategias científicas para identificar y describir los sistemas y procesos termodinámicos que se les plantearon en las pruebas de caracterización inicial.

Subnivel $\boldsymbol{EA1}_{Ci} = i^*_{3b}$: esquemas de Adela, Darío y Alfonso

La única diferencia entre el esquema de Ana y los de Adela, Darío y Alfonso (obsérvese que dos de ellos son del mismo grupo de trabajo que Ana, $\boldsymbol{G}_A$) está en que éstos no aplicaron en sus respuestas la definición del trabajo como uno de los mecanismos de transferencia de energía entre el sistema y su entorno. Por tanto, una vez finalizada la secuencia didáctica *Termoquímica*, sus esquemas ***ER2*** y ***EA1*** son bastante completos, y en general superaron las dificultades conceptuales que demostraban al principio de la intervención; solamente Alfonso demostró no conceptualizar adecuadamente un sistema termodinámico, el de *Ci02*, pero parece que estos problemas están relacionados con su falta de autorregulación en la lectura de la cuestión.

El caso de Adela permite inferir que la secuencia didáctica *Termoquímica* ayudó a los alumnos a utilizar destrezas y estrategias de la ciencia escolar: la mejoría que experimentó en su ***EA1*** desde el principio de la fase previa es muy significativa, sobre todo si tenemos en cuenta que padecía una enfermedad metabólica que le dificultaba el aprendizaje conceptual y procedimental. Con ayuda del profesor y de sus compañeros, tenía el ***EA1*** menos completo de la muestra, aunque no había grandes diferencias entre los distintos esquemas; pero en la batería de caracterización inicial su ***EA1*** es no sólo comparable a los de los demás alumnos, sino que se encuentra entre los más completos, y sus respuestas a pruebas difíciles como *Ci05* (*Descripción de resultados de la prueba Ci05 de caracterización inicial*, pág. 871) revelan que su construcción de destrezas y estrategias de la ciencia escolar marchó sobre seguro, porque Adela se demostró capaz de transferir sus conocimientos incluso a cuestiones difíciles; solamente en *Ci02* se bloqueó y, después de pensar mucho qué respuesta podía dar a un sistema de tipo ingenieril, con el que no estaba familiarizada, optó por dejar en blanco la prueba.

Subnivel $\boldsymbol{EA1}_{Ci} = i^*_{3a}$: esquemas de Clara y Benito

Estos dos alumnos, además de no activar la relación ***I38***, tampoco utilizaron la variación de volumen en el control y exclusión de las magnitudes termodinámicas, a pesar de que las dos actividades de tipo cualitativo plateaban procesos químicos en los que se produce la liberación de un gas. Pero, en general, Clara y Benito utilizaron las destrezas y estrategias de la ciencia escolar en la identificación y descripción de los sistemas termodinámicos, como habían demostrado en las últimas actividades de la fase previa (ver ***Capítulo III***).

Nivel $EA2_{Ci}$ = i_2^*: esquema de Diana

En sus respuestas a las pruebas, Diana no estableció claramente suficientes signficados de la ciencia escolar como para que se considere que conocía los principales aspectos de la Termoquímica relacionados con los sistemas materiales, y no demostró que hubiera conceptualizado la dependencia entre la variación de la energía interna, el calor y el trabajo; tampoco activó las relaciones sobre el trabajo y la varación de volumen. Sus respuestas son en general simples (con la excepción de la de *Ci01*, aunque en ésta obtuvo alguna ayuda del profesor), y el aprendizaje de las destrezas y estrategias relacionadas con la obtención de resultados termodinámicos mediante el tratamiento matemático de datos fue claramente insuficiente.

Nivel $EA2_{Ci}$ = i_1^*: esquema de Brais

El esquema ***EA1*** de Brais tiene solamente 15 relaciones activadas de las 42 totales, bastante lejos de los de sus compañeros (por ejemplo, Diana utilizó 25 ideas de la ciencia escolar). Las ideas que más utilizó parecen ser las que ya conocía antes de la intervención en el aula: la variación de temperatura de un sistema está asociada a un cambio en la energía del mismo (aunque Brais no defina como calor la transferencia de energía correspondiente). Así pues, podemos afirmar que interiorizó las destrezas básicas relacionadas con la identificación de los sistemas termodinámicos y con su caracterización mediante las magnitudes de energía interna (el sistema tiene energía, y su cantidad de energía puede variar) y de temperatura. También reconoció que los sistemas tienen volumen, lo que completa una definición básica de la materia: todo aquello que en el universo tiene una masa asociada y ocupa un volumen en el espacio.

Como en la fase previa, los estudiantes de la muestra no tuvieron grandes dificultades para desarrollar de manera autónoma las destrezas que permiten reconocer los sistemas objeto de estudio en Química y conceptualizar que los procesos consisten en evoluciones posibles de los mismos, que se estudian mediante la identificación, cuantificación y control de los cambios sucedidos. Pero otra vez se observó una falta significativa de conocimiento conceptual sobre la estructura de los sistemas materiales y sobre las propiedades de los mismos que permiten definir su estado, detectar cambios en éste e indagar en las características distintivas de los procesos. Los alumnos que mejores conocimientos conceptuales desarrollaron en las pruebas de caracterización inicial (niveles *i* altos de ***ER2***), son también los que más repetidamente demostraron sus destrezas en la identificación y descripción de los sistemas y procesos termodinámicos, con la excepción de Adela, que a lo largo de la unidad didáctica sobre *Termoquímica* avanzó más en el desarrollo de destrezas y estrategias que en la construcción de conocimientos conceptuales. Hasta qué punto se traduciría este aprendizaje procedimental en una mejor adquisición de los

conceptos y modelos de la ciencia escolar durante la fase de intervención, se estudia en el ***Capítulo V***.

Esquema *EA2: Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial de la muestra.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 56* recoge los elementos y relaciones de los esquemas de acción ***EA2*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas en la caracterización inicial, cada una con su frecuencia de activación *f* correspondiente (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y el códigos ***Cód*** que se utiliza para identificarla dentro del esquema de acción ***EA2*** (símbolo ***R***).

Tabla 56: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)****, extraídas de las pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	28	*R01*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	28	*R02*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	27	*R03*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	20	*R04*
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	19	*R05*
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	30	*R06*
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	30	*R07*
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	17	*R08*
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	14	*R09*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	16	*R10*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	16	*R11*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	16	*R12*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	0	*R13*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	0	*R14*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	0	*R15*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	0	*R16*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	0	*R17*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	18	*R18*
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	18	*R19*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	16	*R20*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	16	*R21*
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	17	*R22*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	0	*R23*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	18	*R24*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	0	*R25*
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	0	*R26*

CALOR se mide en JULIO/MOL	8	*R27*
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	0	*R28*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	0	*R29*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	17	*R30*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	0	*R31*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	0	*R32*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	0	*R33*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	0	*R34*
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	11	*R35*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	0	*R36*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	23	*R37*
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	28	*R38*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	28	*R39*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	27	*R40*

El esquema referencial de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** se compone de 40 relaciones, y los datos de la *Tabla 56* muestran que los estudiantes activaron algo más de la mmitad: 25, frente a las 33 de la fase previa. Como anteriormente, las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la elaboración de ***representaciones algebraicas*** que den cuenta de la ***identificación y descripción de aspectos termodinámicos*** y de la ***interpretación de aspectos termodinámicos***, y de la necesidad de atenerse a ***convenios*** para alcanzar una ***consistencia en la simbología*** utilizada, sobre todo en lo que se refiere al ***léxico científico***. Los alumnos demostraron tener conciencia de que el lenguaje científico se caracteriza por la *eliminación de la polisemia cotidiana* y una gran *precisión*, aunque todavía se manifestaron algunas dificultades para traducir estas ideas en una expresión escrita adecuada y en ciertos obstáculos para alcanzar una ***consistencia en la simbología*** con la que estandarizar las ***representaciones algebraicas***. Las relaciones que no se activaron en ***Ci*** aunque se habían demostrado en ***Fp*** tienen que ver con las escalas absolutas de temperatura y energía interna, así como con la realización de representaciones icónicas.

De las 27 relaciones ya trabajadas en cursos anteriores, los esquemas idiosincrásicos sobre ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** presentan una $f_{(no\ nuevas)} = 427$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 16$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 11$; frente a ellas, $f_{(nuevas)} = 79$, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = 6$ y $\sigma_{(nuevas)} = 8$. La enorme diferencia que se encontró en ***Fp*** entre los promedios de activación de ambos grupos de relaciones se ha reducido, pero sigue siendo considerable, y la dispersión de los datos en cuanto a las ideas recién adquiridas es todavía elevada. Los resultados subrayan que hubo dificultades en la construcción de las ideas nuevas del esquema referencial de ***EA2***, como era de esperar, teniendo en cuenta el bajo nivel de manipulación consciente y reflexiva de las cantidades de magnitud que demostraron los alumnos durante las actividades de *Termoquímica*, incluso en la expresión y operación sobre variables con las que llevaban familiarizados muchos años, como la temperatura y la presión. Sin embargo, la comparación de las medias de activación por alumno y

prueba muestra que la utilización de las unidades adecuadas para la variación de entalpía se generalizó en ***Ci***, hasta el punto de que se distinguió entre el el J y el J/mol, y que se tuvo más en cuenta la estequiometría de las reacciones químicas, con respecto a lo observado en ***Fp***.

Recuérdese que las destrezas iniciales en la estimación de cantidades y la simbolización de la información científica mediante signos estandarizados (CH_4, T, ΔH…) y mediante cantidades de magnitud, eran deficientes para 2º de Bachilllerato, y se observaron dificultades relacionadas con nociones matemáticas básicas, como la de número real. La adquisición del léxico científico fue lenta y no se completó en una extensión deseable.

En la *Tabla 57* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, para cada una de las 5 pruebas de la caracterización inicial.

Tabla 57: activación de las relaciones del esquema de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)*** *en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	56	8	11	(2,9)
Ci02	35	5	9	(0,9)
Ci03	155	7	25	(0,25)
Ci04	147	8	25	(0,25)
Ci05	113	5	24	(0,24)

Se presentaron 10 de los 11 alumnos, pero fueron 8 los que entregaron los guiones de trabajo. Brais dejó en blanco la prueba *Ci03*, y hubo tres alumnos que hicieron lo mismo en *Ci02* y *Ci05*: fueron Diana y (otra vez) Brais. Además, Adela no respondió a *Ci02*, y Benito a *Ci05*.

La comparación entre las frecuencias de activación de ***Ci*** y ***Fp*** muestra que los alumnos utilizaron más destrezas y estrategias de la ciencia escolar para representar léxica y matemáticamente los aspectos energéticos de los procesos termodinámicos, en las pruebas de perfil cuantitativo, como era de esperar. Tanto las frecuencias *f* como el número de relaciones activadas es elevado, y coincide con los valores máximos de activación de las actividades más productivas de la secuencia *Termoquímica*. De estos datos estadísticos se deduce que los estudiantes utilizaron de manera autónoma tantas relaciones adecuadas como en las tareas en las que contaron con una interacción colaborativa entre ellos y la intervención del profesor para ayudarles a construir y transferir ideas.

En cuanto a las duplas *(mín,máx)*, otra vez se observa que los máximos no son sustancialmente diferentes de los correspondientes a las actividades de *Termoquímica*, y que los mínimos son nulos, debido a los problemas actitudinales

que ya se han comentado. Así pues, la mayoría de los alumnos demostraron una buena activación de relaciones del esquema ***EA2*** (de lo contrario, las frecuencias no serían tan elevadas en la fase previa, con 10 u 11 asistentes, como en ***Ci***, con solamente 8 participantes activos).

La prueba que mejores valores de activación logró es nuevamente *Ci03*, de perfil cuantitativo, pero a la vez más variada y completa que *Ci04* y *Ci05* en cuanto a lo conceptual. Entre *Ci01* y *Ci02* no se verifica una gran diferencia de f ni de R, y teniendo en cuenta que la segunda prueba es bastante más difícil y menos significativa para los alumnos, los datos apuntan hacia un cierto dominio del lenguaje científico y de las representaciones algebraicas de los aspectos termodinámicos, que se exterioriza en la elaboración de respuestas a cuestiones de complejidad, nivel de abstracción y demanda conceptual diferentes.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA2***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos. Se categorizaron en los niveles y subniveles de la *Tabla 58*.

Los niveles i de ordenación de los ***EA2*** idiosincrásicos son tres, de i_1^* a i_3^* (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar), señalados con un asterisco para indicar que el nivel más alto de activación del $\boldsymbol{EA2}_{Ci}$ es inferior al más bajo de ***Fp***, así que ambos grupos de esquemas no son equiparables. Se han establecido dos subdivisiones en i_3^* (ver *Tabla 58*).

Tabla 58: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción ***EA2***, ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos*** *termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	i_3^*						i_2^*	i_1^*	-		
	i_{3b}^*	i_{3a}^*									
ALUMNOS	**Clara**	**Ana**	**Alfonso**	**Benito**	**Adela**	**Darío**	**Diana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

CONCEPTOS TERMODINÁMICOS											
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	💣	💣	💣	💣	💣	💣	💣	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	✓	💣	💣	💣	💣	💣	💣	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	✓	💣	💣	💣	💣	💣	💣	✓			

A continuación se describen los esquemas ***EA2*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{EA2}_{Ci} = [i_1^*, \ldots, i_3^*]$.

Nivel $\boldsymbol{EA2}_{Ci} = \boldsymbol{i_3^*}$: subniveles $\boldsymbol{i_{3b}^*}$ e $\boldsymbol{i_{3a}^*}$

Este nivel, el más cercano a la ciencia escolar, contiene los esquemas de seis alumnos, ordenados en los subniveles i_{3b}^* y i_{3a}^*.

Subnivel $\boldsymbol{EA2}_{Ci} = i_{3b}^*$: esquema de Clara

El ***EA2*** de Clara contiene la mayoría de las relaciones que se pretendían construir durante la implementación de la unidad didáctica *Termoquímica*. Las únicas que no se activaron en las pruebas de caracterización inicial fueron las que se corresponden con unidades de medida que no eran estrictamente necesarias para realizar las tareas propuestas: la declaración de la escala Kelvin de temperatura y de las unidades de J para medir el trabajo y de J/mol para la energía interna.

Esta alumna experimentó una clara mejoría en su utilización del lenguaje científico y de la simbología matemática a lo largo de la fase previa, y demostró sus progresos en las respuestas a las pruebas de caracterización inicial, a pesar de que en la fase previa no había llegado a utilizar las unidades de J/mol para expresar las cantidades de trabajo y de variación de energía interna. Como ejemplo del aprendizaje realizado por esta alumna, se rescatan sus manifestaciones escritas a *Ci01(1)*. En ellas se percibe cómo Clara utiliza términos cotidianos para redactar sus observaciones de manera informal, y a renglón seguido las interpreta utilizando el lenguaje de la ciencia escolar:

[Clara, Ci01(1)]: (…) Tamén se apreciaba que o tubo quentábase. (…). intercambiando H_2 co entorno e a enerxía mediante un proceso de calor xa que cando entraba en contacto co HCl e o Zn aumentaba a temperatura. (…).

Sus únicas dudas están en la expresión de la estequiometría de los procesos químicos, probablemente relacionada con las dificultades que tenía en la conceptualización del concepto de número y en la realización de cálculos básicos sin ayuda de la calculadora.

Subnivel $\boldsymbol{EA2}_{Ci} = i^*_{3a}$: s de Ana, Alfonso, Benito, Adela y Darío

En los ***EA2*** de estos alumnos se activaron prácticamente todas las relaciones que utilizó su compañera Clara, aunque con una diferencia sustancial: tuvieron dificultades para construir descripciones e interpretaciones que reflejaran la monosemia y la precisión propias del lenguaje científico.

Por su brevedad, se ofrecen a continuación algunos ejemplos del léxico alternativo que utilizaron estos alumnos en las pruebas de caracterización inicial. Se han seleccionado extractos de las respuestas a la prueba *Ci01*, que presentaba un proceso químico relacionado con otro ya conocido por los alumnos:

[Alfonso, Ci01(1)]: (…) Despois de esperar a que se produza a reacción observase que o tubo está quente. (…) Enerxía en forma de calor, xa que o tubo se quenta e materia polos gases desprendidos. (…) A reacción do Zn co HCl produce unha reacción que libera hidróxeno e en contacto co osíxeno e a chama prodúcese unha combustión entre o O_2 e o H_2 e producese $H_2O_{(g)}$. (…)

Recuérdese que varios profesores habían reconvenido a Alfonso durante el curso por la total falta de interés que mostraba a la hora de expresar de manera inteligible sus ideas.

[Adela, Ci01(1)]: Que la reacción empieza a burbujear ~~(Al acercarlo al grifo de agua una vez que la reacción deja de herbir) Al acercar el~~ hasta que el Zn se deshace. (…) Que es un sistema endotermico puesto que en el se libera energía. (…)

Ana fue la que más acercó sus expresiones a las científicas, aunque la complejidad de *Ci02* puso a prueba la claridad y exactitud de sus descripciones. Su respuesta revela que era capaz de identificar adecuadamente el sistema objeto de estudio, pero cuando quería expresar la idea de "disolución", tendía a referirse a ella como "agua":

[Ana, Ci02(1)]: -Trátase dun sistema formado por unha cuba de auga que contén dous electrodos de Zn e Cu.

Cando se conectan, mediante un proceso de traballo obtense enerxía. (…)

Prodúcese un fluxo de H_2 ó introducir o Zn no ácido por unha reacción. (…)

Ó introducir os dous electrodos no sistema que é a auga, e reacciona o Zn e o Cu o que fai que se desprenda enerxía.

En cuanto a Benito y Darío, ambos tuvieron dificultades para expresar las ideas relacionadas con el calor de acuerdo con el lenguaje científico, y en un intento por sistematizar sus descripciones, expresaron la idea de que la materia se presenta "en forma de" distintas sustancias.

[Benito, Ci01(1)]: (…) É un sistema aberto, za que a reacción intercambia materia en forma de hidróxeno co entorno, e intercambia enerxía en forma de calor que libera a reacción.

[Darío, Ci01(1)]: É un sistema aberto porque intercambia materia (en forma de $H_{2(g)}$) e enerxía (en forma de calor). (…).

Utilizaron el lenguaje matemático adecuadamente, y expresaron las ecuaciones sobre el calor y la variación de entalpía de acuerdo con los convenios internacionales. Los problemas que les impidieron obtener los resultados deseables son de tipo actitudinal: estos alumnos sabían que los valores numéricos "correctos" estaban en un intervalo al que no pertenecían sus resultados, así que decidieron intercambiar valores de diferentes magnitudes relacionadas hasta hacer encajar los números. Pero el logro de aprendizaje en aspectos como la expresión adecuada de las cantidades de magnitud se aprecia claramente, sobre todo en Darío, que al

prinicipio de la intervención era bastante desordenado en cuanto al lenguaje matemático, y propenso a olvidarse de los signos de los valores numéricos.

El logro más destacable de la metodología ensayada en cuanto a la representación algebraica de los aspectos termodinámicos, está en que los alumnos sintieron la necesidad de declarar las cantidades de magnitud en las unidades de medida adecuadas y a sistematizar la expresión de las operaciones matemáticas en líneas de cálculo diferentes, utilizando los operadores matemáticos. En cuanto a la expresión lingüística, ya se ha comentado que antes de la intervención los estudiantes tenían bastantes dificultades para exteriorizar sus ideas y plasmarlas por escrito (ver ***Capítulo III***); a lo largo de las actividades de *Termoquímica*, se observa un progreso en la utilización del léxico científico, aunque todavía se observó una cierta tendencia a confundir los conceptos de sensación térmica, temperatura y calor, a pesar de que la comprensión conceptual era mayor. Todos los alumnos demuestran cambios significativos hacia una expresión escrita más cuidadosa. Sin embargo, la sistematización de las observaciones e interpretaciones sigue sin ser suficiente para el nivel de 2º de Bachillerato: se observa que los estudiantes planifican poco la redacción de sus ideas y prefieren anotarlas a medida que se les van ocurriendo. El resultado es la generación de textos breves, en los que la progresión de ideas es desordenada y a veces errática.

En lo que respecta a las representaciones icónicas, en la caracterización inicial no se elaboró ningún dibujo. Por no utilizarse ideas del dominio microscópico de la materia, y parece que también por haber aprendido a expresar con mayor precisión sus ideas, los alumnos no parecieron considerar necesaria ninguna aclaración pictórica relacionada con la estructura material de los sistemas ni con la dinámica de los procesos planteados.

Nivel $EA2_{Ci}$ = i_2^*: esquema de Diana

Esta alumna no utilizó las unidades de J/mol para expresar las cantidades de calor puestas en juego en los procesos termodinámicos propuestos, y no aplicó criterios de decisión de la ciencia escolar en los que se apreciara una contribución personal a la hora de tomar interpretar los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización. Tanto sus ***ER***s como sus ***EA***s están entre los niveles más bajos de ordenación, lo que indica que realizó un aprendizaje pobre comparado con el que se pretendía y con el que alcanzaron la mayoría de sus compañeros. Desde el principio de la unidad didáctica sobre Termoquímica tenía dificultades para expresar las dependencias entre conceptos teóricos utilizando las expresiones matemáticas, por lo que partía de unos conocimientos iniciales bastante fragmantados, y su desempeño en el trabajo de aula fue más bien bajo. Aprovechando la circunstancia de que se encontraba en el grupo G_D con Darío, uno de los más trabajadores de la clase (y con Débora, que al principio de la fase previa también demostraba un nivel de interés aceptable por la materia de Química), Diana prefería esperar a que sus

compañeros elaboraran las respuestas, para después adaptarlas a sus guiones de trabajo si le parecían convincentes. Parecía llevar a pies juntillas una estrategia de posposición del aprendizaje (Elliot, 1990) que no dio sus frutos: Diana fue una de los tres alumnos que obtuvieron la calificación de 0,0 en el examen tradicional de la asignatura sobre Química Orgánica y Termoquímica (ver ***Volumen A***), y desde entonces abandonó sus esperanzas de aprobar la asignatura en junio y redujo drásticamente su asistencia a las sesiones de clase.

Nivel $EA2_{Ci}$ = i_1^*: esquema de Brais

Nuevamente, el esquema de Brais es notablemente más incompleto que el de sus compañeros. Se trata del único alumno de la muestra que no llegó a aplicar el concepto de variación de entalpía para determinar las transferencias de energía por calor asociadas a los procesos propuestos, y sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial se pueden calificar como deficientes tanto en la utilización de conocimientos conceptuales y procedimentales, sin necesidad de elaborar un análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, a la vista de sus manifestaciones escritas. Aunque en su ***EA2*** figuren como activadas sin dificultades las relaciones de la ciencia escolar que se recogen en la *Tabla 58*, no se debe olvidar que la brevedad de las respuestas de este alumno no permite extraer muchas conclusiones sobre su grado autónomo de utilización del lenguaje científico, además de que no realizó un solo cálculo matemático, ni una sola representación icónica. Durante la fase previa, si un cálculo le parecía laborioso, copiaba la respuesta de sus compañeros, y en ocasiones ni siquiera esto. Dada su falta de interés en realizar en clase cualquier proceso cognitivo mínimamente demandante, y puesto que la construcción de destrezas suele ser más lenta que la de razonamientos, no es de extrañar que los esquemas de acción de Brais sean tan incompletos que sólo contengan unas pocas relaciones cuya articulación no es suficiente para completar tareas o estrategias científicas de alto nivel.

Esquema *EA3*: *Representación gráfica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial de la muestra.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 59* recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de acción ***EA3*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron en la caracterización inicial de la investigación. En la *Tabla 59* se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***G***.

Tabla 59: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3)****, extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	2	*G01*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	2	*G02*
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	2	*G03*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	6	*G04*
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	4	*G05*
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	4	*G06*
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	6	*G07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	16	*G08*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	16	*G09*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	13	*G10*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	6	*G11*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	6	*G12*
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	6	*G13*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	4	*G14*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	0	*G15*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	3	*G16*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	6	*G17*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	6	*G18*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	0	*G19*
EJES presentan DIVISIONES	0	*G20*
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	0	*G21*
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	2	*G22*
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	0	*G23*
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	0	*G24*
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	4	*G25*
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	0	*G26*
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*G27*
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	0	*G28*
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	6	*G29*
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	6	*G30*
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	6	*G31*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	6	*G32*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	6	*G33*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	3	*G34*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	0	*G35*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	0	*G36*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	0	*G37*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	6	*G38*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	6	*G39*

De las 39 relaciones del esquema referencial ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos***, los estudiantes activaron 27. Las tres relaciones que no utilizaron en ***Ci***, pero sí en ***Fp***, se refieren al establecimiento de ***divisiones*** en la gráfica. Las frecuencias *f* indican que los alumnos fueron capaces de elaborar diagramas entálpicos aceptables de acuerdo con la ciencia escolar y de manera autónoma para expresar los balances energéticos de los procesos químicos.

Las frecuencias de activación *f* y los promedios para las relaciones que eran ya conocidas de cursos anteriores, son: $f_{(no\ nuevas)}$ **= 68**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 3** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 3**; y $f_{(nuevas)}$ **= 91**, con promedio

de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = 5$ y $\sigma_{(nuevas)} = 5$. Al comparar los datos de frecuencia con las correspondientes a la fase previa, si se realiza la media por alumno y prueba o actividad, se obtiene un resultado favorable a la influencia de la metodología en las ideas de los estudiantes: las dos pruebas de ***Ci*** obtienen mejor *f* que las actividades de ***Fp***, en lo que parece una consolidación de las ideas de la ciencia escolar. En la caracterización inicial, promedios de activación es más elevado para las relaciones nuevas que para las ya conocidas; elevada dispersión indica que se llegó a una efectividad aceptable en la elaboración de gráficas termodinámicas, a pesar de los problemas de aprendizaje, pero no todos los alumnos llegaron a construir un ***EA3*** completo para este momento de la intervención.

Nuevamente, las pruebas involucraban la realización de una representación gráfica, más compleja que la interpretación (García y Perales, 2007). Los pares de datos no se facilitaban directamente en el enunciado de las cuestiones, sino que los alumnos tenían que extraerlos las tablas de datos termodinámicos, previa identificación de los valores de variación de entalpía adecuados para cada sustancia química y cálculo de la ΔH correspondiente a cada estado del sistema.

En la *Tabla 60* se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***procesos termodinámicos***, para cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial.

Tabla 60: activación de las relaciones del esquema de acción ***procesos termodinámicos*** *(**EA3**) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	0	8	0	(0,0)
Ci02	0	5	0	(0,0)
Ci03	15	7	3	(0,3)
Ci04	110	8	27	(0,23)
Ci05	34	5	25	(0,25)

Recuérdese que se presentaron 10 de los 11 alumnos, pero fueron 8 los que entregaron los guiones de trabajo. Brais dejó en blanco las pruebas *Ci02*, *Ci03* y *Ci05*; Diana, *Ci02* y *Ci05*; Adela, *Ci02*; y Benito, *Ci05*.

Las pruebas que piden la elaboración de un diagrama entálpico son *Ci04* y *Ci05*, pero en *Ci03* se esperaba la activación de las tres relaciones sobre la representación de datos termodinámicos mediante las ecuaciones termoquímicas, como efectivamente sucedió. Según la tabla de datos, el número de relaciones trabajadas en las pruebas es comparable al de las actividades de la fase previa (así lo muestra el indicador *R*); la frecuencia de activación de *Ci04* apunta hacia una activación irregular, y de hecho se trata de un valor similar al de *Fp14*. Otra vez, la explicación a esta *f* está en el número de alumnos que llegan a realizar una representación gráfica de los procesos químicos propuestos: cinco alumnos de ocho (Ana, Alfonso, Adela, Clara y Darío). En *Ci05*, únicamente Adela llegó a esbozar un

diagrama entálpico, mientras que los demás se limitaron a escribir las ecuaciones termoquímicas del ciclo de Born-Haber.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA3***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

El referencial ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** sirvió para elaborar los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, esquemas que se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la *Tabla 61*.

Los niveles *i* de ordenación de los ***EA3*** idiosincrásicos son cuatro, de i_1 a i_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar, y comparables a los esquemas que se construyeron a lo largo de la fase previa). Pero en ***Ci*** apenas hay subdivisiones, es decir, que los alumnos demostraron una mayor homogeneidad en sus respuestas (ver *Tabla 61*).

*Tabla 61: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción **EA3**, Representación gráfica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	i_4	i_3		i_2		i_1			-		
						i_{1b}	i_{1a}				
ALUMNOS	**Adela**	**Ana**	**Darío**	**Alfonso**	**Clara**	**Benito**	**Diana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✓	✖	✖	✖	✖	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	✓	✖	✖	✖	✖	·	·	·			
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✖	✖	✖	✖	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✓	✓	✖	✖	·	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✖	✖	·	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	✓	✓	✓	✖	✖	·	·	·			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EJES presentan DIVISIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			

DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✗	✗	✗	✗	·	·	·			
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✓	✓	✗	✗	·	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			

A continuación se describen los esquemas ***EA3*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{EA3}_{Ci} = [i_1, \ldots, i_4]$.

Nivel $EA3_{Ci} = i_4$: esquema de Adela

El ***EA3*** de Adela es el que más se acerca a las ideas deseables, por la calidad del diagrama entálpico que elaboró en *Ci04* y por el intento de plasmar en otro el complejo ciclo de ecuaciones de *Ci05* (*Descripción de resultados de la prueba Ci05 de caracterización inicial*, pág. 871); en todas las pruebas, utilizó las ecuaciones termoquímicas y sus ciclos de acuerdo con la simbología aceptada.

Con su ***ER3***, esta alumna vuelve a demostrar que realizó un aprendizaje considerable de las acciones de la ciencia escolar desde las actividades de la fase previa: en las primeras sesiones de ésta, Adela había copiado las gráficas de Darío, porque los conocimientos iniciales que sostenía no le fueron útiles para construir por sí misma los diagramas entálpicos que se pedían. En *Fp13*, no tenía claro que las gráficas se basan en la representación de pares de datos relacionados, y en su representación superpuso unos datos del estados inicial sobre otros, lo que parece indicar que entonces no supo plasmar los valores de la variable independiente de acuerdo con las ideas científicas. Pero en *Ci04* su diagrama cumple con todos los requisitos para considerarlo adecuado y muy completo, salvo por el pequeño detalle de que coloca los datos del estado inicial y estado final uno sobre otro; no obstante, la aclaración "productos" y la flecha que une los valores ambos estados indican que Adela utilizó la simbología de manera meditada para dar una idea de las transferencias globales de energía que se implican en el proceso químico.

Nivel $EA3_{Ci} = i_3$: esquemas de Ana y Darío

Los ***EA3*** de Ana y Darío son similares al de Adela, salvo en que los esquemas de estos alumnos contienen cuatro de las relaciones como alternativas. No adecuaron las divisiones y el tamaño de la gráfica a los convenios que aseguran la legibilidad de las gráficas, y por esta razón sus diagramas entálpicos no son tan fácilmente interpretables. Realizaron sus representaciones en un tamaño tan pequeño que resulta incómodo de leer, y la rotulación es insuficiente, aunque las manifestaciones escritas de ambos estudiantes respaldan una interpretación científica de la reacción química planteada en *Ci04*.

Los progresos de Ana son notables, teniendo en cuenta las ideas que hizo explícitas en la fase previa. En cuanto a Darío, sus gráficas siguen presentando problemas de legibilidad, por el pequeño tamaño con que las traza y por la falta de convenios claros para rotular los ejes, como ya había sucedido en ***Fp***.

Ambos alumnos utilizaron sin problemas la simbología científica para expresar las ecuaciones termoquímicas y sus ciclos.

Nivel $EA3_{Ci} = i_2$: esquemas de Alfonso y Clara

Los diagramas entálpicos de Ávaro y Clara también tienen un tamaño y unos intervalos de valores que dificultan la legibilidad de las gráficas. Además, ambos alumnos tuvieron dificultades para identificar qué pares de datos debían representar. No llegaron a establecer que la variación de entalpía se representa para los estados inicial y final, a pesar de que Clara había sido en ***Fp*** la única alumna de la muestra que había indicado inequívocamente esta idea. Sin embargo, en *Ci04* situó a una altura relativa adecuada los datos que representó, lo que hace pensar que los problemas de aprendizaje con el significado de los números negativos y el concepto de valor absoluto podrían estar en periodo de superación.

Los dos alumnos de este nivel utilizaron adecuadamente las ecuaciones termoquímicas y establecieron ciclos con las mismas.

Nivel $EA3_{Ci} = i_1$: subniveles i_{1b} e i_{1a}

En el nivel más alejado de las ideas de la ciencia escolar se sitúan los esquemas de acción de los tres alumnos que no realizaron ningún diagrama entálpico en sus respuestas a las pruebas de la batería de caracterización inicial.

Subnivel $\boldsymbol{EA3}_{Ci} = i_{1b}$: esquemas de Benito y Diana

Estos dos alumnos solamente activaron las tres relaciones que se refieren a la simbología científica de las ecuaciones termoquímicas y al establecimiento de ciclos de ecuaciones, de acuerdo con las leyes de la Termoquímica y en atención a la naturaleza de la variación de entalpía como función de estado del sistema. Recuérdese que Benito no había elaborado gráficas en la actividad *Fp13* de la secuencia didáctica ensayada, y que Diana, alumna de escaso desempeño en las

clases, no realizó ningún diagrama entálpico en la fase previa, y tuvo dificultades para expresar las dependencias entre conceptos teóricos utilizando las expresiones matemáticas. Sí activó, de acuerdo con las ideas de la ciencia escolar, las tres relaciones sobre la utilización de las ecuaciones termoquímicas para representar el balance energético global asociado a los procesos químicos.

Subnivel $\boldsymbol{EA3}_{Ci} = i_{1a}$: esquema de Brais

Brais solamente llegó a escribir ecuaciones termoquímicas para dar cuenta de los aspectos energéticos asociados a las reacciones químicas.

Esquema *EA4*: *Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*

Se presentan aquí los esquemas de acción de ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** que demostraron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial de la muestra.

Análisis general de los resultados

La *Tabla 62* recoge los ***EA4*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las pruebas de la batería de caracterización inicial. Se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** están representadas por el símbolo ***E***.

*Tabla 62: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (**EA4**), extraídas de las pruebas de caracterización inicial*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	33	*E01*
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	33	*E02*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	33	*E03*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	31	*E04*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	31	*E05*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	28	*E06*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*E07*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	30	*E08*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	30	*E09*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	16	*E10*
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	16	*E11*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	0	*E12*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	0	*E13*

OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	0	*E14*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	0	*E15*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	0	*E16*
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*E17*
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	32	*E18*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	32	*E19*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	30	*E20*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	20	*E21*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	16	*E22*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	11	*E23*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	0	*E24*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	0	*E25*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{\text{reversible}}/T$ (MACROSCÓPICA)	0	*E26*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	0	*E27*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	6	*E28*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{\text{expansión}} = -p \cdot \Delta V$	0	*E29*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{\text{sistema}} = -\Delta E_{\text{entorno}}$	11	*E30*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	0	*E31*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	18	*E32*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	17	*E33*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	0	*E34*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	2	*E35*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	18	*E36*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	17	*E37*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	18	*E38*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	18	*E39*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	7	*E40*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	18	*E41*
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	13	*E42*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	7	*E43*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	0	*E44*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	0	*E45*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	18	*E46*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	18	*E47*
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	18	*E48*
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	18	*E49*
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	20	*E50*
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	18	*E51*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	5	*E52*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	5	*E53*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	0	*E54*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	0	*E55*
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	0	*E56*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	0	*E57*
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	0	*E58*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	17	*E59*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	17	*E60*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	17	*E61*

CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	17	*E62*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	0	*E63*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	0	*E64*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	0	*E65*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	31	*E66*

En la caracterización inicial se activaron 42 de las 66 relaciones de *Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*, frente a las 58 que se utilizaron en la fase previa. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren a las etapas de la investigación científica: ***emisión de hipótesis***, ***selección y aplicación de estrategias de obtención de datos***, ***selección y aplicación de estrategias de transformación de datos***, y ***contraste de hipótesis***. Se pone de manifiesto la importancia la ***lectura comprensiva de las cuestiones planteadas*** y la ***consulta de fuentes bibliográficas*** con la finalidad de seleccionar la información relevante en el análisis de los procesos termodinámicos. También destaca positivamente la ***transformación de datos sobre las magnitudes termodinámicas***, que se realiza mediante el ***tratamiento matemático***. Sin embargo, en ***Ci*** los alumnos no utilizaron ningún modelo de reacción química para interpretar los resultados relacionados con las transferencias de energía que tienen lugar entre el sistema y el entorno (***I44***).

Las 16 relaciones del esquema referencial que se utilizaron en ***Fp*** pero no en ***Ci*** están relacionadas con la realización de medidas experimentales, la consulta de fuentes de información como el libro de texto, *Internet* o las actividades de la secuencia didáctica *Termoquímica*.

Nuevamente, se puede considerar que los esquemas iniciales de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** son suficientes como para abordar el estudio de la Termodinámica Química partiendo de la Termoquímica, a pesar de que los conocimientos conceptuales de los alumnos no se pueden considerar satisfactorios para el nivel de 2º de Bachillerato, y en lo que se refiere al dominio microscópico las ideas iniciales no estaban lo suficientemente articuladas como para constituir esquemas de razonamiento útiles en la elaboración de interpretaciones profundas sobre las reacciones químicas. Los estudiantes fueron capaces de realizar de manera autónoma, sin ayuda del profesor y sin un contexto colaborativo *inter pares*, las principales acciones que se involucran en las investigaciones científicas. Desde que empezó la fase previa de la investigación y hasta este momento de la intervención, se observa un claro progreso en las destrezas y estrategias de resolución de problemas, paralela a la construcción de esquemas de razonamiento de mayor capacidad descriptiva e interpretativa.

De las 49 relaciones del referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** que eran ya conocidas para los alumnos, las frecuencias de activación *f* y sus correspondientes promedios de activación son:

$f_{(no\ nuevas)}$ = **690**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ = **14** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ = **12** y $f_{(nuevas)}$ = **127**, con $\bar{x}_{(nuevas)}$ = **7**, y $\sigma_{(nuevas)}$ = **8**. Si se eliminan las que no pertenecen al ámbito de la Termoquímica y se seleccionan sólo las relaciones nuevas esperables, $\bar{x}_{(nuevas;esperables)}$ = **13**, con $\sigma_{(nuevas;esperables)}$ = **7**. Estos datos estadísticos indican que la metodología ensayada ha tenido éxito en la construcción de un esquema de acción útil en la resolución de cuestiones problemáticas de base científica, esquema en el que se incluyeron nuevas relaciones procedimentales que reflejan las destrezas y estrategias que los alumnos fueron capaces de poner en práctica sin interacción con los compañeros ni con el profesor.

Al comparar las medias de activación por alumno y prueba o actividad, se observa que los estudiantes fueron más eficaces en ***Ci*** que en ***Fp*** a la hora de coordinar las acciones que forman el núcleo de las estrategias de resolución de cuestiones problemáticas. Las relaciones ***E01***, ***E02***, ***E03***, ***E10***, ***E11***, ***E18***, ***E19***, ***E20***, ***E22***, ***E33***, ***E36***, ***E37***, ***E38***, ***E46***, ***E48*** y ***E66*** tienen una mayor aceptación en ***Ci*** que en ***Fp***, lo que apunta hacia una consolidación de las destrezas y estrategias que forman parte de la praxis científica.

La *Tabla 63* recoge información sobre la activación de las relaciones de *resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*, para cada una de las 5 pruebas de la caracterización inicial, tal y como se ha hecho para los demás esquemas de razonamiento y acción.

*Tabla 63: activación de las relaciones del esquema de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (**EA4**) en cada una de las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra*

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Ci01	113	8	17	(12,17)
Ci02	62	5	13	(0,13)
Ci03	271	7	42	(0,42)
Ci04	212	8	36	(0,36)
Ci05	159	5	33	(0,33)

Se presentaron 10 de los 11 alumnos, y 8 entregaron los guiones de trabajo. Tres pruebas no generaron respuesta por parte de algunos estudiantes: Brais, Adela y Diana no respondieron a *Ci02*, Brais también dejó en blanco *Ci03*, así como *Ci05*, a la que tampoco contestó Benito.

La activación de ***EA4*** es más buena en ***Ci***, sobre todo para las pruebas *Ci03* y *Ci04*, que exigen una interpretación de los aspectos energéticos de los procesos, previa transformación de datos numéricos de variaciones de entalpía asociadas a distintas reacciones químicas que se relacionan entre sí mediante ciclos de ecuaciones termoquímicas. Los valores de frecuencia son inferiores incluso en estas pruebas a los obtenidos en las actividades de la fase previa, pero el número de relaciones activadas (indicador *R*) es superior. Ésta es una situación de bajos valores

de *f* y *A*, unidos a un alto valor de *R*: no todos los alumnos activan ***EA4*** adecuados, pero algunos conectan un gran número de relaciones en sus esquemas idiosincrásicos. Para analizar las causas de esta clara dicotomización de la muestra deben estudiarse los niveles y subniveles de ordenamiento de los ***EA4***, que se detallan en el apartado siguiente. Los valores de las duplas (*mín,máx*), que se comentan a continuación, también aportan información sobre estos aspectos.

Los valores de los parámetros estadísticos de ***EA4*** pueden ser consistentes con la generación de respuestas eficaces, aunque breves, a las cuestiones problemáticas planteadas en la batería de caracterización inicial de la muestra, o con una transferencia de conocimientos aceptable, pero algo irregular. Las pruebas menos eficaces en la promoción de las destrezas y estrategias fueron *Ci02* y *Ci01*, que exigen la elaboración de descripciones detalladas para distintos procesos químicos. Las diferencias entre los valores de ambas pruebas demuestran el éxito de la metodología ensayada para construir relaciones de la ciencia escolar que se transfieran eficazmente a la interpretación de los aspectos energéticos de procesos físicos y químicos diversos, en situaciones nuevas y en contextos diferentes, a pesar de que los alumnos mostraron dificultades para describir e interpretar la reacción redox de la prueba *Ci02*. La transferencia de conocimientos se puede considerar aceptable incluso cuando tiene lugar para la descripción de una reacción química totalmente desconocida (teniendo en cuenta las deficiencias en los esquemas de razonamiento iniciales de los estudiantes): aunque las *f* caen de *Ci01* a *Ci02*, los valores de *R* no son demasiado dispares, y a medida que los alumnos realizaban más pruebas y ordenaban y sistematizaban sus observaciones e interpretaciones, ponían en juego más destrezas y estrategias de la ciencia escolar, adaptando sus ideas a las nuevas situaciones propuestas.

Las duplas *(mín,máx)* reflejan una vez más los efectos de la *rendición* de algunos estudiantes, que dejaron en blanco algunas pruebas por considerarlas demasiado difíciles. Pero, si se omiten los datos *mín* = 0, se observa que no hay diferencias muy grandes en la activación de ***EA4*** entre los alumnos que elaboraron respuestas a las pruebas. Esta homogeneización en la activación se debe, como ya se apuntó en el ***Capítulo III***, a la consolidación de las destrezas que permiten la identificación e descripción de los procesos (no tanto la interpretación profunda de los cambios que experimentan los sistemas, para lo que se requiere la aplicación de ideas relacionadas con los modelos de la Química). Los resultados de ***EA4***, pues, vuelven a ser consistentes con los de ***EA1***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, se elaboraron los correspondientes esquemas de acción de los alumnos, que aparecen recogidos en la *Tabla 64*. Los esquemas ***EA4*** se han categorizado en cuatro niveles *i* de ordenación, de i_1^* a i_4^* (de

menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar), con dos subniveles para i_4^* y tres para i_3^*. Los asteriscos que señalan los niveles $\boldsymbol{EA4_{Ci}}$ indican que el nivel más alto de activación del $\boldsymbol{EA4_{Ci}}$ es inferior al más bajo de $\boldsymbol{EA4_{Fp}}$, de manera que ambos grupos de esquemas no son equiparables.

Tabla 64: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción ***EA4****,* ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	i_4^*		i_3^*				i_2^*	i_1^*	-		
	i_{4b}^*	i_{4a}^*	i_{3c}^*	i_{3b}^*		i_{3a}^*					
ALUMNOS	**Adela**	**Ana**	**Benito**	**Clara**	**Darío**	**Alfonso**	**Diana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	·	✓	✓	✓	✓	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	·	·	·	·	·	·	·	·			
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

TRATAMIENTO MATEMÁTICO											
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{reversible}/T$ (MACROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{expansión} = -p \cdot \Delta V$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{sistema} = -\Delta E_{entorno}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓	✓	✓	✖	✖	✓	✓	✓			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✓	✖	·	✖	✖	✖	·	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			

analizar los COSTES DEL PROCESO											
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

A continuación se describen los esquemas ***EA4*** prototípicos de cada nivel de ordenación, y se comentan las características que explican su categorización en los niveles $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = [i_1^*,\ldots,i_4^*]$.

Nivel $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = i_4^*$: subniveles i_{4b}^* e i_{4a}^*

Este nivel está compuesto por dos subniveles, i_{4b}^* e i_{4a}^*, siendo el primero el más acorde con la ciencia escolar.

Subnivel $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = i_{4b}^*$: esquema ***EA4*** de Adela

Esta alumna no tuvo grandes dificultades para activar las 43 relaciones de ***EA4*** que se se han comentado en el apartado anterior. Dado que no activación de las demás relaciones no resta capacidad, en este momento de la intervención, al esquema en la resolución de problemas en Termoquímica, se puede considerar que Adela puso en juego destrezas y estrategias útiles en la interpretación de los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos. El progreso en los esquemas de razonamiento de esta alumna va parejo a la construcción de esquemas de acción más sofisticados, aunque, al igual que para todos sus compañeros, la falta de un nivel adecuado de destrezas relacionadas con la simbología y las operaciones matemáticas frustraran la obtención de mejores resultados numéricos; pero, a pesar de ello, esta alumna (y la mayoría de los otros) demostraron que entendían y sabían llevar a la *praxis* los pasos básicos de una estrategia basada en las acciones propias del conocimiento científico, para responder preguntas sobre Termoquímica.

Subnivel $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = i_{4a}^*$: esquema ***EA4*** de Ana

La única diferencia del esquema de Ana con respecto al de Adela es que Ana no llegó a realizar un diagrama entálpico adecuado en apoyo de la transformación de datos sobre las magnitudes termodinámicas. Habría que esperar a la fase de intervención para comprobar hasta qué punto la metodología fue capaz de ayudar a esta alumna a superar sus problemas para representar gráficamente los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos.

Nivel $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = i_3^*$: subniveles i_{3c}^*, i_{3b}^* e i_{3a}^*

Este nivel está compuesto por tres subniveles, i_{3c}^*, i_{3b}^* e i_{3a}^*, entre los que se distribuyen los esquemas de cuatro alumnos.

Subnivel $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = i^*_{3c}$: esquema ***EA4*** de Benito

Además de no realizar ninguna representación gráfica en las pruebas de caracterización inicial (lo que hace pensar que no superó las dificultades que se evidenciaron en la fase previa), este alumno no demostró suficiente pericia en la extracción de los datos termodinámicos contenidos en las pruebas ***Ci***.

Subnivel $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = i^*_{3b}$: esquema ***EA4*** de Clara

No superó las dudas que presentaba anteriormente en relación con la elaboración de representaciones gráficas sobre los aspectos energéticos de los procesos químicos y con la utilización de la simbología matemática adecuada. Parece que sus principales obstáculos para la construcción de un esquema de acción más completo está en problemas de aprendizaje de los conocimientos matemáticos, como revela su respuesta al item *Ci03(1)*: esta alumna era consciente de que las transferencias energéticas por calor dependen de la cantidad de materia presente en el sistema, y de que debía calcular la masa de éste. Tomó la relación masa/mol adecuada para el único producto de la reacción química, el cual representa, para un rendimiento teórico del 100% de conversión de los reactivos, la masa total del sistema. Pero, a la hora de llevar estas relaciones teóricas a un cálculo efectivo, se dio cuenta de que no disponía del número de mol de producto, y la inseguridad hizo que sus ideas entraran en barrenar: en lugar de hallar la cantidad de masa correspondiente al número de mol del reactivo limitante, se obsesionó con el hecho de que la relación molar entre todas las sustancias implicadas es 1:1, y realizó una regla de tres tautológica por la que asoció que 1 mol de producto tiene los 74,1 g que indica su masa molar, y en proporción directa, por tanto, 1 mol de producto… tiene 74,1 g. Transfirió este resultado a la ecuación mediante la que calculó el calor involucrado en la reacción, que para ella se puede resumir en términos de masa como *una tonelada de cal viva genera 74,1 g de cal apagada*.

En la misma situación se encuentra Darío, que demostró más nivel de destrezas en las operaciones matemáticas, pero una confusión mayor que Clara en la selección de los datos: en *Ci03(1)*, por ejemplo, tomó como masa de producto la cantidad de masa de agua, y con ella calculó el número de mol de cal apagada, a la que después asoció con el calor específico ¡del agua!

Subnivel $\boldsymbol{EA4}_{Ci} = i^*_{3a}$: esquema ***EA4*** de Alfonso

Este alumno no realizó diagramas entálpicos adecuados en sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial, y no llegó a tomar decisiones basadas en sus observaciones ni en la transformación de datos para obtener resultados, por lo que sus estrategias en la resolución de problemas son incompletas. Por ejemplo, en *Ci03(1)*, después de haber calculado que la temperatura de la bodega del barco mercante experimentaba un aumento de 930 ºC por la entrada de la vía de agua, afirmó que el transporte de cal viva por vía marítima es peligroso porque esta

sustancia química es "un material corrosivo". Estos resultados son consistentes con los hallados en el ***Capítulo III***: tenía dificultades para expresar las dependencias entre conceptos teóricos utilizando las expresiones matemáticas, y para interpretar el significado de los datos numéricos, aunque éstos correspondieran a magnitudes ya conocidas por él, como la temperatura.

Nivel $EA4_{Ci}$ = i_2^*: esquema de Diana

El ***EA4*** de esta alumna es significativamente más incompleto que el de sus compañeros de los niveles i_3^* y i_4^*. Con respecto al esquema de Alfonso, se observa que no activó la relación ***I35***, porque no realizó ningún diagrama entálpico; tampoco aplicó parte de las fórmulas de la Termoquímica para obtener resultados, ni interpretó los que pocos a los que llegó, sino que se limitó a presentar un número como resultado final.

Nivel $EA4_{Ci}$ = i_1^*: esquema de Brais

Poco hay que comentar acerca del ***EA4*** de este alumno. Demostró que reconocía las etapas de las investigaciones científicas, pero su falta de conocimientos conceptuales y su actitud pasiva le impidieron realizar con éxito las acciones adecuadas para la resolución de las preguntas propuestas. Sus manifestaciones escritas son pobres y ponen de manifiesto que quizá Brais supiera más de lo que vertía en sus respuestas a las pruebas, pero en todo caso no tenía la intención de ir más allá, y no había trabajado lo suficiente las destrezas de razonamiento como para realizar un aprendizaje conceptual que ayudara a articular acciones de la práctica científica en el análisis termodinámico de los procesos físicos y químicos.

IV.3.3. Análisis mediante competencias

En este apartado se analizan las competencias que demostraron los alumnos en sus respuestas a las cinco pruebas que conformaron la batería de caracterización inicial, ***Ci***. Se evalúan seis competencias (competencia científica, competencia matemática, competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, competencia social y ciudadana, competencia en comunicación lingüística y competencia en aprender a aprender), con especial énfasis en la competencia científica, que se desglosa en tres competencias (capacidades) más concretas: identificación de cuestiones científicas, explicación científica de fenómenos y utilización de pruebas científicas, además de las actitudes hacia la Ciencia.

De las manifestaciones escritas que produjeron los estudiantes en sus respuestas a pruebas de caracterización inicial, se han extraído los elementos de la competencia (unidades de análisis) que vertebran las competencias (capacidades) descritas. A cada elemento de la competencia se le adjudicó una puntuación numérica de acuerdo con los indicadores de la competencia (***IC***s), cuyos valores se obtienen mediante la suma de los valores de los factores de la competencia (***FC***s)

que se presentaron en el ***Volumen A***. La evaluación de los aspectos actitudinales se realizó siguiendo la escala de puntuaciones que se describió en el ***Capítulo III***.

La determinación de los niveles de competencia alcanzados en las distintas pruebas se realizó mediante la comparación de los valores de competencia idiosincrásicos con los dos valores referenciales de la ciencia escolar, VRC_1 y VRC_2, que permiten definir los niveles $NC = NC_1,\ldots,NC_5$. Los resultados de este análisis revelan el aprendizaje que realizaron los alumnos como consecuencia de su interacción con la primera unidad didáctica ensayada, *Termoquímica*, en términos de las competencias que fueron capaces de poner en juego en sus respuestas de manera autónoma (sin ayuda de un experto ni de sus compañeros).

En las tablas que vienen a continuación se recogen los valores medios, aproximados por redondeo a la unidad, para los niveles de las distintas competencias que demostraron los alumnos en las pruebas de caracterización inicial. Dichos valores se han hallado calculando el promedio estadístico de los niveles de competencia para las 5 pruebas de la batería de caracterización inicial ***Ci***, en las que los alumnos deben elaborar respuestas escritas a cuestiones de base científica. Las dos últimas columnas de las tablas incluyen el promedio estadístico de los niveles de competencia para los ocho alumnos que se presentaron a las pruebas, y la correspondiente desviación típica.

Tabla 65: promedio de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra

ALUMNO	Ana	Alfonso	Braís	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en el conoc. e interacción con el mundo físico	**3**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,93**
Identificación de cuestiones científicas	**4**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2**	**4**	**1**	**2,75**	**1,39**
Reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia	**4**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,88**	**1,36**
Reconocer la base científica de la cuestión (conocimientos de la Ciencia y sobre la Ciencia)	**5**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**2**	**4**	**1**	**3,00**	**1,93**
Utilizar estrategias de búsqueda de información científica, comprenderla y seleccionarla	**4**	**4**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,88**	**1,25**
Reconocer los rasgos claves de la investigación científica	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
Explicación científica de los fenómenos	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Aplicar (transferir) los conocimientos de la Ciencia	**3**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,38**	**0,92**
Describir y explicar fenómenos científicamente y predecir cambios	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,38**	**0,92**

Reconocer descripciones, explicaciones y predicciones	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,25**	**0,89**
Utilización de pruebas científicas	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,25**	**1,04**
Interpretar datos y pruebas, elaborar y comunicar conclusiones	**5**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**4**	**5**	**1**	**3,25**	**1,67**
Argumentar en pro y en contra de las conclusiones, e identificar supuestos, pruebas y razonamientos	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,25**	**1,04**
Reflexionar sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
Actitudes hacia la Ciencia	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Interés hacia la Ciencia y la actividad científica. Apoyo a la investigación científica. Concepción de Ciencia	**3**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,93**
Sentido de la responsabilidad sobre sí mismo, los recursos y el entorno	**3**	**3**	**2**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,75**	**0,46**

Según la *Tabla 35*, solamente cinco alumnos alcanzaron un nivel de la competencia científica que se puede considerar aceptable, y tres (Ana, Adela y Darío) llegan al nivel medio. Para la primera de las tres competencias (capacidades) científicas, el promedio de la muestra se acerca al 3,00, así que se da por plenamente adquirido el nivel $\boldsymbol{NC_2}$ (medio-bajo) en la identificación de cuestiones científicas. Obtuvieron un buen nivel en el reconocimiento de cuestiones científicamente investigables, en la identificación de la base científica de la cuestión y en la aplicación de los rasgos claves de la investigación científica.

La segunda de las competencias (capacidades) sigue siendo una asignatura pendiente: en conjunto, los alumnos no llegan al $\boldsymbol{NC_2}$ en la explicación científica de los fenómenos (promedio inferior a 2,00), y nuevamente la causa está en las dificultades para la transferencia de los conocimientos adquiridos a la interpretación de los aspectos energéticos de nuevos hechos y fenómenos. En cuanto al reconocimiento de descripciones, explicaciones y predicciones científicas, y a la realización de las mismas, se alcanza el mismo nivel: Ana, Alfonso, Adela, Clara y Darío llegan al nivel medio $\boldsymbol{NC_3}$. A diferencia de lo que sucedió en ***Fp***, estos datos no demarcan la zona de desarrollo próximo, sino la de desarrollo real, porque el profesor, Rodrigo, no les ayudó a realizar la transferencia de conocimientos ni a identificar las variables que tenían que investigar. Así pues, los resultados de ***Ci*** indican qué conocimientos científicos son capaces de movilizar los alumnos de manera autónoma para dar respuesta a cuestiones de base científica. En cuanto a la tercera de las capacidades de la competencia científica (la utilización de pruebas científicas), hay seis alumnos que alcanzan o sobrepasan el nivel $\boldsymbol{NC_2}$, así que las tres cuartas partes de la muestra han desarrollado sus competencias adecuadamente.

Obsérvese que, sin ayuda del profesor, hay cuatro alumnos que alcanzan NC_3. La reflexión sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos sigue sin ser adecuada, resultado esperable teniendo en cuenta los obtenidos en la fase previa.

Las actitudes sólo son aceptables para los seis alumnos a los que nos hemos referido en el párrafo anterior; el resto de la muestra cae al nivel NC_1, por los problemas actitudinales que se han comentado a lo largo del capítulo.

Tabla 66: promedio de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia matemática	**4**	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,88**	**1,64**
Identificar situaciones que exigen conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**4**	**5**	**1**	**3,50**	**1,85**
Utilizar el lenguaje matemático para cuantificar aspectos relacionados con los fenómenos naturales	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**4**	**5**	**1**	**3,63**	**1,77**
Utilizar técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar expresar datos e ideas	**5**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,50**	**2,07**
Realizar cálculos sobre los fenómenos naturales	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,63**	**1,92**
Realizar representaciones gráficas sobre fenómenos naturales	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,50**	**1,41**

Cinco alumnos alcanzan o sobrepasan el nivel medio (NC_3), lo que confirma el éxito de la metodología en la mejora de las competencias matemáticas con respecto a los primeros momentos de la fase previa. Cada alumno presenta datos bastante homogéneos en sus distintos aspectos de la competencia matemática (identificación de situaciones que exigen conocimientos matemáticos, utilización del lenguaje matemático, etc.), con la excepción de las competencias en la realización de representaciones gráficas, que son en general muy bajas para todos salvo para Adela; se concluye que las destrezas y estrategias de representación de las cuestiones relacionadas con la representación gráfica estaban en consolidación.

Tabla 67: promedio de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y comeptencia en el tratamiento de la información y comepetencia digital, que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en comunicación lingüística	**3**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,63**	**1,06**
Comprender e interpretar mensajes acerca de las Ciencias	**5**	**5**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,50**	**1,69**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos con contenido científico	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,13**	**1,55**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la comunicación de ideas (saber decir)	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,13**	**1,55**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción del conocimiento (saber hacer)	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Saberes actitudinales relacionados con las tareas comunicativas: utilizar el lenguaje de forma razonada y dialogante en la regulación de conductas y emociones	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Competencia en el tratamiento de la información y Competencia digital	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
Aplicar las formas específicas del trabajo científico para buscar, recoger, seleccionar la información, procesarla y presentarla	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
Utilizar las TIC para comunicarse, recabar información, visualizar situaciones, obtener y tratar datos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Salvo Brais y Diana, los alumnos que se presentaron voluntariamente a las pruebas de caracterización inicial llegan al nivel medio de competencia lingüística. Pero con respecto a la fase previa se observa que, sin ayuda del experto, los niveles tienden a caer, lo que demuestra que es necesaria una instrucción específicamente orientada a promover las destrezas de lectoescritura y de iniciación a la utilización del lenguaje científico. Las dificultades no se encuentran tanto en la interpretación de mensajes de contenido científico y en la utilización del vocabulario científico para expresar ideas relacionadas con la Termodinámica, sino (de nuevo) en la utilización adecuada del lenguaje en la construcción de conocimiento, que al comienzo de la fase previa se reveló como deficiente y que no mejoró de manera sustancial. Las

descripciones científicas de los alumnos carecen de la sistematización suficiente como para que se puedan considerar adecuadas para el nivel de 2º de Bachillerato.

Tabla 68: promedio de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en la caracterización inicial de la muestra

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia social y ciudadana	**4**	**2**	**2**	**4**	**1**	**1**	**4**	**2**	**4**	**4**	**1**	**3,25**	**1,04**
Comprender y explicar de manera científica problemas de interés social	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,50**	**2,07**
Aplicar el conocimiento sobre debates esenciales para el avance de la Ciencia, para comprender cómo han evolucionado las sociedades y para analizar la sociedad actual	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**2,88**	**1,55**
Comportarse individualmente según las normas y valores democráticos, al relacionarse con los demás y afrontar los conflictos	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**4,00**	**0,00**
Cooperar y comprometerse en el trabajo científico y en las relaciones interpersonales	**3**	**3**	**2**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,75**	**0,46**
Competencia en aprender a aprender	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**4,00**	**0,00**
Iniciarse en el aprendizaje y ser capaz de continuarlo de manera autónoma (saber ser)	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Desenvolverse ante las incertidumbres: tratando de buscar respuestas, admitiendo diversas soluciones ante un mismo problema	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Habilidad para organizar el tiempo de forma efectiva y perseverancia en el aprendizaje	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,00**

Los datos de las competencias social y ciudadana muestran la dicotomización de la muestra: cinco alumnos (Ana, Benito, Adela, Clara y Darío) se encuentran en el nivel medio-alto (NC_4), mientras que los demás están en el nivel medio-bajo, debido a los problemas actitudinales que ya se han comentado. A pesar de que se han establecido unos valores referenciales mínimos de la competencia (VRC_1) que fueran relativamente fáciles de alcanzar si el alumno asistiera a las clases y mostrara una actitud dialogante y abierta con sus compañeros y con el profesor, Brais y Diana se mantienen en un nivel aceptable por la mínima en la cooperación y compromiso personal. En lo que respecta a la competencia en aprender a aprender, el patrón de niveles que se observa es elevado: demuestran autonomía en el aprendizaje todos los alumnos, incluidos Benito y Adela, que en grupo no habían desarrollado tanta independencia en su trabajo, por timidez e inseguridad en sus conocimientos en el caso de Adela, y por desconfianza y enfado con sus compañeros

de grupo (Benito) a lo largo de la fase previa. Alfonso alcanza el mismo nivel que sus compañeras de grupo en cuanto a la iniciativa en la elaboración de respuestas y el diseño de estrategias de resolución, lo que demuestra que su tendencia a esperar a que ellas obtuvieran solas las respuestas más difíciles o laboriosas forma parte de un problema actitudinal y no de una especial dificultad de este alumno para comprender los enunciados de las cuestiones o transferir conocimientos. En clase, sus compañeras le ayudaban a "reunir las piezas" (en palabras de Rodrigo): cuando se trataba de trazar una estrategia de resolución para un problema, Alfonso prefería esperar a que Ana y Adela estudiaran las variables, propusieran hipótesis y diseñaran la secuencia de pasos a seguir, para él copiar las respuestas después; pero los datos de ***Ci*** indican que su autonomía de trabajo real no era inferior al de ellas.

Como en ***Fp***, los resultados del análisis del aprendizaje por competencias apuntan en el mismo sentido que los del análisis por esquemas de razonamiento y acción, y los de la fase previa y la caracterización inicial arrojan información concordante: a lo largo de la implementación de la secuencia sobre Termoquímica, los alumnos construyeron un conocimiento que podemos considerar aceptable dado el nivel de aprendizaje que tenían al comienzo de la parte experimental; pero demuestran un nivel insuficiente para 2º de Bachillerato en la movilización del conocimiento. Los aspectos lingüísticos son en general descuidados, y las actitudes de algunos alumnos (Brais, Diana) dificultan el aprendizaje. Hasta este punto, se ha descrito el conocimiento a corto plazo (inmediatamente después de terminar la unidad didáctica); mediante las pruebas de caracterización final y de retención de la muestra, se comprobará cuáles de los aprendizajes realizados se muestran estables a medio plazo (esto es, son significativos).

El trabajo en un entorno colaborativo ha favorecido la construcción de nuevas ideas para los alumnos del grupo G_A. En los otros tres grupos, la fragmentación de la cohesión entre miembros debido a la inasistencia de algunos estudiantes y a la tensión entre compañeros (así sucedió en G_B) hizo que, como se preveía, los alumnos que asistieron a clase y cooperaron con los demás hicieran avanzar sus competencias (Benito, Clara y Darío); de los demás, dos dejaron de asistir (Débora, Diana) o de colaborar con los compañeros e interesarse por el trabajo en el aula (Brais, Berta e Carlos).

IV.4. Contraste de la $sHT_{1.2}$

Con el propósito de determinar los conocimientos iniciales de los alumnos, se aplicaron las pruebas que constituyen la batería de caracterización inicial de la muestra. Los resultados permiten indagar en los efectos que tuvo la adaptación a la metodología en la evolución del conocimiento.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos afirmar que esta estrategia de obtención de la información ha tenido éxito por dos motivos: en primer lugar,

porque los alumnos respondieron a las pruebas de caracterización en una medida comparable a las actividades de las secuencias de enseñanza y al examen tradicional. En segundo lugar, el profesor colaborador ha adoptado con gran interés esta estrategia de recogida de información para la evaluación habitual en sus clases.

Los esquemas iniciales del alumnado en este momento de la fase experimental son esquemas incipientes, gérmenes según Vygotsky (1979), que los docentes han de aprovechar para trabajar en las ZDP de los estudiantes y ayudarles a construir y estructurar el nuevo conocimiento.

El seguimiento de los resultados proporcionó a los investigadores suficientes claves para comprobar hasta qué punto los alumnos tenían ideas previas basadas en modelos alternativos de la energía, las transferencias de energía, el enlace y la reacción química. Gracias a esta información, no hubo necesidad de incluir en la batería de caracterización inicial ninguna prueba sobre los conocimientos iniciales de los estudiantes en Termodinámica Química.

Los resultados del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción demostraron que, inicialmente, los alumnos tenían escasos conocimientos sobre los fenómenos propuestos, y manifestaban dificultades para expresar y sistematizar sus observaciones. La falta de integración entre los conocimientos de los dominios macroscópico y microscópico (Johnstone *et al.*, 1982), y la carencia de conocimientos sobre los aspectos microscópicos se han revelado como obstáculos a la hora de dar significado a los conceptos y enunciados termodinámicos.

Los enunciados operativos que se derivaron de la $sHT_{1.2}$ y se utilizan para ponerla a prueba, se confirman.

- Inmediatamente antes de comenzar la unidad didáctica *Termodinámica Química*, se espera que los alumnos:

  - describan adecuadamente los sistemas objeto de estudio a través de variables termodinámicas que sean función de estado del mismo (*Ci01*, *Ci04*; parte del alumnado lo logra en *Ci03* y *Ci05*);

  - establezcan adecuadamente las transferencias energéticas por calor y trabajo que experimentan los sistemas en los procesos físicos y químicos (parte de la muestra, en *Ci01* y *Ci03*);

  - relacionen adecuadamente las transferencias energéticas con los cambios en la energía del sistema, a nivel macroscópico y microscópico (sólo a nivel macroscópico);

  - pongan en juego el primer principio de la Termodinámica en relación con la conservación de la energía (no);

  - relacionen la magnitud entalpía con el calor transferido a presión constante y con la variación de energía del sistema (sí se relaciona con la

variación de energía interna, y con el calor, sin especificar las condiciones);

- utilicen los intercambios de energía para clasificar los procesos como exotérmicos o endotérmicos, en función de las variaciones de energía interna o de entalpía (*Ci01*, *Ci03* y *Ci04*);

- apliquen las leyes de la Termoquímica y sus implicaciones para estudiar los procesos químicos desde el punto de vista energético (*Ci04*, y parte del alumnado en *Ci05*);

- justifiquen los cambios en la energía del sistema mediante razonamientos fundamentados en los modelos microscópicos de la Química (no);

- tengan suficientes destrezas relacionadas con las técnicas y métodos matemáticos que se utilizan en Termoquímica: la selección y la interpretación de los datos termodinámicos tabulados y su manipulación algorítmica, y la representación de los aspectos energéticos de las reacciones químicas (*Ci03*, *Ci04*, e incluso en *Ci05* algunos establecen un ciclo de ecuaciones difícil para el nivel inicial de conocimientos).

Así pues, se verifica la subhipótesis ***sHT*$_{1.2}$**, tal como se enunció en el ***Capítulo I*** (ver ***Volumen A***).

Inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes siguen siendo, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Sin embargo, los alumnos activan esquemas de razonamiento y acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar científicamente los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se verifican progresos significativos en los esquemas y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación inicial.

El único esquema de razonamiento y acción que no se activó en absoluto fue ***ER5***, aunque se estima que los alumnos habían construido algunas relaciones del referencial de la ciencia escolar; pero no se decidieron a utilizarlas en sus respuestas a las pruebas.

Universidad de Santiago de Compostela
Facultad de Ciencias de la Educación
Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales

ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA QUÍMICA EN EL BACHILLERATO. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA UNIDAD DIDÁCTICA

Tesis Doctoral, *Volumen B_2*

Iria Pereira García

Santiago de Compostela, año 2015

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DAS CIENCIAS EXPERIMENTALES

ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA QUÍMICA EN EL BACHILLERATO. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA UNIDAD DIDÁCTICA

Firma de la autora: Iria Pereira García

Memoria de Tesis Doctoral

presentada en la ***Universidad de Santiago de Compostela*** para optar al Grado de Doctor en Ciencias de la Educación

Iria Pereira García

Santiago de Compostela, noviembre de 2015

O DR. JOSÉ MANUEL DOMÍNGUEZ CASTIÑEIRAS, PROFESOR E INVESTIGADOR *AD HONOREM* DA UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

FAI CONSTAR:

Que o traballo de investigación que se recolle na memoria titulada

Ensino da Termodinámica Química no Bacharelato. Deseño, implementación e avaliación dunha unidade didáctica,

foi realizado baixo a súa dirección pola licenciada en Ciencias Químicas, Dna. Iria Pereira García, no Departamento de Didáctica das Ciencias Experimentais da USC, e que, de acordo co artigo 33 do Regulamento de estudos de Doutoramento, valora positivamente e autoriza a súa presentación como Tese de Doutoramento para a obtención do grao de Doutor por parte da interesada.

Santiago, 5 de novembro de 2015

Firmado: D. José Manuel Domínguez Castiñeiras (director da Tese)

A DRA. BLANCA PUIG MAURIZ, PROFESORA DA UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA,

FAI CONSTAR:

Que o traballo de investigación que se recolle na memoria titulada

Ensino da Termodinámica Química no Bacharelato. Deseño, implementación e avaliación dunha unidade didáctica,

foi realizado baixo a súa titoría pola licenciada en Ciencias Químicas, Dna. Iria Pereira García, no Departamento de Didáctica das Ciencias Experimentais da USC, e que, de acordo co artigo 33 do Regulamento de estudos de Doutoramento, valora positivamente e autoriza a súa presentación como Tese de Doutoramento para a obtención do grao de Doutor por parte da interesada.

Santiago, 10 de novembro de 2015

Firmado: Dna. Blanca Puig Mauriz (titora da Tese)

V. Valoración del conocimiento construido durante la fase de intervención

En este capítulo se procede al contraste de la *Hipótesis de Trabajo 2* (HT_2) de la presente investigación. Para ello, se ha realizado el seguimiento del proceso de construcción del conocimiento a lo largo de la implementación de la segunda propuesta didáctica, en lo que hemos denominado fase de intervención, dado que en esta fase de la investigación puede considerarse que se ha logrado minimizar la influencia del cambio metodológico en el proceso de aprendizaje. A tal efecto, se han analizado las manifestaciones orales y escritas del alumnado a lo largo de las dieciséis actividades que constituyen la secuencia *Termodinámica Química*.

A lo largo de los distintos apartados del ***Capítulo V*** se describen la toma, el tratamiento, la transformación y el análisis de los datos a partir de los cuales se han obtenido los resultados que han permitido contrastar la *Hipótesis de Trabajo 2* (HT_2) de la presente investigación:

Planteamiento y fundamentación de la *HT2* (pág. 963). Se plantea y justifica la segunda hipótesis de trabajo de la investigación.

Aplicación y desarrollo de la segunda propuesta didáctica (fase de intervención) (pág. 965). Se describen brevemente las pautas seguidas en la aplicación y desarrollo de la segunda propuesta didáctica en el aula, para analizar cómo fue percibida, en contraposición con la singularidad e idiosincrasia de cada alumno, una vez superadas las dificultades asociadas al cambio metodológico.

Análisis y discusión de los resultados (pág. 968). En este apartado se describen y analizan los resultados obtenidos del seguimiento de la fase de intervención. Estos resultados se han estudiado mediante dos tipos de análisis cualitativo, a cada uno de los cuales se dedica un apartado independiente:

Análisis mediante esquemas de conocimiento (pág. 968). Se detalla el análisis de los esquemas de razonamiento y de los esquemas de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Análisis mediante competencias (pág. 1063). Se realiza un análisis de las competencias que desarrollaron los estudiantes a medida que resolvieron las situaciones problemáticas planteadas en las actividades realizadas durante la fase de intervención. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas por los estudiantes en sus respuestas a las actividades de la secuencia sobre Termodinámica Química.

Contraste de la *HT2* (pág. 1070). Se establecen las conclusiones derivadas del análisis discutido en el presente capítulo, análisis que ha permitido la verificación o refutación de la Hipótesis de Trabajo 2 (HT_2).

V.1. Planteamiento y fundamentación de la HT_2

Las estrategias de evaluación del aprendizaje deben estar en consonancia con las finalidades de la ciencia escolar: que los estudiantes logren un aprendizaje significativo de conceptos, modelos y procedimientos científicos útiles para interpretar situaciones, hechos y fenómenos del mundo natural, y que adquieran una serie de actitudes y valores que les permitan construir una imagen actualizada de la Ciencia y de la actividad científica. Por este motivo, el modelo de diseño, planificación y desarrollo de las propuestas de enseñanza ensayadas propone una evaluación formativa integrada en el proceso de aprendizaje. Las manifestaciones que elabora el alumnado durante la construcción de conocimiento pueden considerarse en continua retroalimentación con los efectos que se van generando como consecuencia de la interacción con las propuestas de enseñanza. Por esta razón, basamos el seguimiento del aprendizaje en el análisis de las manifestaciones orales y escritas de los alumnos, recopiladas a partir de los materiales de trabajo de éstos y del registro videográfico y de audio de las sesiones de aula.

Para concretar el enunciado de la segunda hipótesis de trabajo, y dado que la muestra de la presente investigación es de tipo incidental y ocasional, se excluye toda intención de generalizar los resultados que se derivan de su estudio. En consecuencia, la segunda hipótesis se formula en los siguientes términos:

> La aplicación en el aula de la metodología ensayada, favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con la ciencia escolar, que permiten a los estudiantes construir, estructurar y transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos. A lo largo de la aplicación de la segunda propuesta en el aula, los estudiantes avanzan significativamente en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

La HT_2 hace referencia a las condiciones finales del conocimiento de los estudiantes inmediatamente después de la aplicación de la segunda unidad didáctica. Considerando que la producción oral y escrita revela la incorporación de las relaciones establecidas a lo largo de la intervención y, por tanto, pone de manifiesto la implicación de cada individuo en la evolución de su propio

conocimiento, para contrastar la HT_2 se realizó un seguimiento del aprendizaje mediante el análisis de las manifestaciones orales y escritas que elaboraron los alumnos como respuesta a las quince actividades que se pudieron implementar de las dieciséis de la secuencia *Termodinámica Química*.

Este seguimiento ha permitido comprobar cómo fue percibida la primera propuesta de enseñanza ensayada, en contraposición con la singularidad e idiosincrasia de cada alumno. El aprendizaje realizado se evalúa mediante los dos métodos de análisis cualitativo cuyos resultados se describen en el ***Volumen A***. Los enunciados operativos que se derivan de la HT_2 y se utilizan para ponerla a prueba, son los siguientes:

- Al comienzo de la unidad didáctica *Termodinámica Química*, se espera que los alumnos:
  - no hayan construido el significado de la espontaneidad de reacción en relación con el sentido de evolución de los sistemas químicos;
  - no justifiquen la utilidad de la función de estado entropía para el estudio de la evolución de los sistemas químicos;
  - no den significado macroscópico y microscópico al concepto de entropía;
  - no interpreten los principios segundo y tercero de la Termodinámica;
  - no comprendan el concepto de energía de Gibbs como función de estado extensiva que proporciona una condición de espontaneidad y equilibrio para los sistemas;
  - no relacionen la variación de la energía de Gibbs con el trabajo útil y con las variaciones de las funciones de estado entalpía y entropía;
  - no reconozcan los criterios de espontaneidad de reacción referidos al universo (variación de la entropía del universo) y al sistema (variación de energía de Gibbs del sistema); y
  - no hallan desarrollado estrategias para obtener información sobre la espontaneidad de las reacciones químicas, interpretando datos termodinámicos de acuerdo con razonamientos fundamentados en los conceptos y los principios termodinámicos.
- La realización de las actividades de *Termodinámica Química* ayuda a los alumnos a mejorar significativamente sus conocimientos, en términos de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias científicas utilizadas.

Antes de describir e interpretar en profundidad los resultados correspondientes a la fase de intervención, se detallan las pautas que se siguieron en la aplicación y desarrollo de la segunda propuesta en el aula.

V.2. Aplicación y desarrollo de la segunda propuesta didáctica (fase de intervención)

El profesor colaborador en esta investigación, Rodrigo Montes Rodríguez, llevó a su aula las dos unidades didácticas ensayadas de acuerdo con la metodología propuesta, y trabajó activamente para establecer en clase un entorno de trabajo en el que se fomentaran situaciones en las que los alumnos identificaran y valoraran sus propias ideas, las de sus compañeros y las de la ciencia escolar.

Como ya se ha comentado en el ***Volumen B1***, en las actividades de exploración o de aplicación, la dinámica de trabajo comenzaba con la entrega del guion a los alumnos. Una vez que éstos habían leído los materiales escritos, realizaban las tareas en pequeño grupo. Rodrigo supervisaba la dinámica interna de los grupos, animando a los estudiantes a compartir ideas, formulándoles preguntas encaminadas a guiar los razonamientos, aclarándoles las dudas que surgían sobre el planteamiento o la extensión de las tareas, ayudándolos a hacer explícitas hipótesis y conclusiones, a elaborar argumentos para justificarlas y a identificar contradicciones, afirmaciones tautológicas e interpretaciones superficiales. Como resultado del trabajo en pequeño grupo, los alumnos anotaban en sus materiales de trabajo las observaciones e interpretaciones que iban elaborando. No intervenía para alterar el desarrollo de los debates en función de que los estudiantes alcanzaran o no un consenso en sus ideas: cuando las observaciones e interpretaciones de los componentes de un grupo divergían demasiado entre sí, cada alumno anotaba sus ideas personales y las desarrollaba, trabajándolas conjuntamente con aquellos compañeros con los que compartían sus ideas.

Esta dinámica se mantuvo tanto en las actividades teóricas como en las experimentales, independientemente del tipo de tarea.

Una vez realizadas las tareas en pequeño grupo, se establecía una puesta en común en gran grupo. El profesor invitaba a los alumnos a exponer sus hipótesis, resultados y conclusiones. Se analizaban las distintas aportaciones y se identificaban los resultados, razonamientos y argumentaciones divergentes. Rodrigo ejercía de moderador en un debate en el que se comparaban las propuestas de los distintos grupos, profundizando en las superficialidades o contradicciones presentes, e introducía las ideas de la ciencia escolar en las situaciones que lo hacían oportuno. Su intervención terminaba cuando se llegaba a unas conclusiones consensuadas entre todos, y se volvía a la dinámica de trabajo en pequeño grupo, para que los alumnos anotaran las nuevas respuestas en sus guiones de trabajo y analizaran, con el resto de la clase, las diferencias entre sus ideas iniciales y las desarrolladas en el debate en gran grupo.

El grado de intervención de Rodrigo variaba en función del tipo de actividad (exploración, indagación o aplicación), para adaptarse al contexto de instrucción: el

papel del profesor comenzaba siendo discreto, para que los alumnos identificaran y maduraran ideas sin sentir que se los vigilaba; gradualmente se hacía más intervencionista, dependiendo de la necesidad de ayudar a los estudiantes en la evolución de sus ideas y en el desarrollo del trabajo personal y grupal; y volvía paulatinamente a un papel menos intervencionista para terminar ejerciendo de consejero, a medida que los alumnos progresaban en la confrontación de ideas y la superación de dificultades en el aprendizaje. Las actividades de indagación se trabajaban a partir de la lectura individual de los guiones de trabajo, en los que se desarrollaban, relacionaban o ampliaban las ideas expuestas en clase. Rodrigo presentaba después los nuevos constructos de la ciencia escolar, aplicándolos a ejemplos concretos, y paso a una puesta en común en gran grupo para analizar las informaciones que ayudan a relacionar los ejemplos con las ideas científicas ya trabajadas en actividades anteriores.

Mientras resolvían los problemas planteados, los alumnos mantuvieron en general una disposición favorable a aprender y a aplicar sus conocimientos, aunque algunos resultaron poco participativos cuando se trataba de expresar en voz alta sus ideas; la producción escrita revela, sin embargo, que la mayoría realizó un intenso trabajo en la resolución de las cuestiones. Cuando ya llevaban varias sesiones resolviendo actividades cognitivamente demandantes, comenzaron a "sospechar" (en palabras del docente) que las calificaciones de la materia de Química se basarían a partir de entonces en la resolución de actividades abiertas. Los encolerizaba, afirmaba Rodrigo, el hecho de que ellos mismos tuvieran que tomar decisiones por sí mismos, sin que el profesor les ofreciese de inmediato la respuesta correcta ni les indicase cómo obtener la solución a problemas que no les interesaban lo más mínimo, aparentemente ni siquiera para aprobar un examen.

En entrevista personal a varios profesores que conocían a estos alumnos por haberles impartido clase durante varios años, la investigadora comprobó que todos los docentes estaban de acuerdo con esta afirmación de Rodrigo. Parece, pues, que a diferencia del fenómeno de posposición del aprendizaje descrito por Elliot (1990), estos alumnos posponían *indefinidamente* el aprendizaje, hasta que se hiciera demasiado urgente asimilar una serie de contenidos demostrar en un momento puntual que son capaces de manejar una serie de conceptos de forma más o menos "completa" y como se les pida, ya sea de manera automática (más sencilla) o de manera reflexiva (más demandante cognitivamente). En opinión de los profesores entrevistados, estos alumnos posponían indefinidamente su aprendizaje porque, para ellos, el mero hecho de tener una edad y asistir a unas sesiones de clase ya les daba derecho a acceder al título de Bachillerato sin necesidad de invertir atención y esfuerzo en aprender una serie de contenidos que consideraban un trámite administrativo encaminado a justificar la consecución del Bachillerato.

Al margen de esta dificultades, Rodrigo siempre se mostró proclive a

defender la dinámica de diálogo en el aula; no obstante, mantenía ciertas reservas sobre la posibilidad de funcionase con alumnos como los de la muestra, con la mayoría "agazapados" en la inseguridad de sus propios conocimientos y una minoría reacia a participar en el trabajo colaborativo, "dinamitando" el entorno de trabajo. A medida que avanzaba la implementación de las propuestas de enseñanza, la inseguridad de Rodrigo fue menguando, a medida que se observaban progresos significativos en el aprendizaje de los alumnos que se mostraban más implicados en el aprendizaje y más participativos en la dinámica de trabajo. A las pocas sesiones, pasó a opinar que para ayudar a los alumnos menos participativos quizá conviniera desarrollar una intervención más expositiva, porque con la nueva dinámica discursiva de aula estos estudiantes podían distraerse más que si sentían "todo el tiempo el aliento del profesor en la nuca" (según sus propias palabras). Pasados varios días, Rodrigo se convenció de que la nueva dinámica de aula sí tenía suficiente capacidad como para generar un aprendizaje comparable al que se potencia mediante dinámicas de aula en las que el profesor toma más responsabilidad sobre la construcción del conocimiento. Tambien se mostró convencido de que el aprendizaje que se estaba logrando, aun en caso de los estudiantes menos participativos, se basaba en formas de razonamiento más profundas y elaboradas que las que utilizarían habitualmente si se desarrollase una dinámica de trabajo "más tradicional". Después de calificar el examen tradicional que se hizo al final de la fase previa, Rodrigo decidió que la prueba escrita no ofrecía una información tan fiable y detallada sobre el aprendizaje realizado por los alumnos, y, comprobando empíricamente la eficacia y fiabilidad de la nueva estrategia de recogida de información, decidió cancelar el nuevo examen tradicional previsto para realizar después de finalizada la intervención (la unidad didáctica sobre Termodinámica Química), y basar totalmente la calificación en el análisis de las manifestaciones orales y escritas que produjeran los estudiantes a lo largo de la fase de intervención y en las caracterizaciones final y de retención. Para incentivar a los alumnos a esforzarse por obtener una calificación positiva dentro del nuevo protocolo de recogida de información para la evaluación, incluyó la batería de pruebas de retención como parte integrante del "examen de recuperación" del tercer trimestre (hacia finales de mayo).

La implementación de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química tuvo lugar cerca de mediados de marzo, en plena época de exámenes. A la primera sesión faltaron muchos alumnos porque al día siguiente había examen de Inglés. Rodrigo les informó de las calificaciones de la evaluación: solamente Ana había aprobado todas las materias, Darío tenía una suspensa, y Benito, dos; todos los demás habían suspendido cinco o seis materias.

En la segunda sesión, a la que Benito faltó para estudiar, los estudiantes presionaron a Rodrigo para que cambiara la fecha de la recuperación de la segunda evaluación, alegando que solamente les quedaba un día para estudiar y que aún no

habían "tocado nada". Rodrigo se vio obligado a ceder, porque los alumnos que se presentaban tenían las dos evaluaciones suspensas, y el fracaso en el examen estaba casi garantizado. Desde luego, parecía más preocupado el profesor que los alumnos, y de hecho, en las conversaciones que se produjeron en pequeño grupo, Adela comentó que se había ido de viaje "a la nieve", y que se había puesto "muy morena". En la tercera y la cuarta clase no habría incidencias dignas de mención. El quinto día, la clase empezó muy tarde, porque era el día inmediatamente anterior al puente de S. José y los alumnos se resistían a entrar en clase (a pesar de que prácticamente la mitad estaban ya dentro del recinto escolar cuando sonó el timbre de cambio de clase). Después del puente de días festivos, las actitudes de los alumnos no mejoraron, y, como en la fase previa, todo intento de que completaran en casa sus manifestaciones escritas o buscaran información sobre las actividades fue un completo fracaso.

V.3. Análisis y discusión de los resultados

Los resultados obtenidos se han descrito e interpretado mediante dos tipos de análisis cualitativo: un *Análisis mediante esquemas de conocimiento* (pág. 968), en el que se indaga en los esquemas de razonamiento y acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos que experimentan los sistemas materiales, y un *Análisis mediante competencias* (pág. 1063), en el que se determinan las competencias que desarrollaron los alumnos a medida que resolvieron las situaciones problemáticas planteadas en las quince actividades implementadas de la secuencia didáctica *Termodinámica Química*. Tanto los esquemas de razonamiento y acción como las competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas en las respuestas a las actividades de la secuencia sobre Termodinámica Química, y se ilustran con manifestaciones orales y escritas representativas de los estudiantes.

V.3.1. Análisis mediante esquemas de conocimiento

En este apartado se analizan y discuten los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los alumnos a lo largo de la fase de intervención (implementación de la unidad *Termodinámica Química*). Se elaboraron cinco esquemas de razonamiento: ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***) y cuatro esquemas de acción (las destrezas en ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***), como se describe en

el ***Volumen A***.

De las manifestaciones orales y escritas que produjeron los estudiantes, se han extraído las relaciones que constituyen esquemas de razonamiento y acción, y, para identificar regularidades en los esquemas, se han elaborado las tablas de frecuencia de activación. En ellas se recogen, para cada individuo, las relaciones pertenecientes a cada esquema, asociadas a la activación que se generó mediante las actividades de *Termodinámica Química*.

A lo largo de los dos apartados siguientes se describen e interpretan los esquemas de razonamiento (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento ER1, …, ER5*, pág. 969) y de acción (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción EA1, …, EA4*, pág. 1022) idiosincrásicos de los alumnos, ordenados en función del esquema del que forman parte y de la complejidad de la estructura esquemática. Dentro de cada apartado dedicado a un esquema, a su vez hay dos: uno titulado "esquemas idiosincrásicos de los alumnos", en el que se describen e interpretan las tablas de datos, y antes de este apartado, una introducción que lleva el nombre "análisis general de los resultados". En ella se detalla con qué frecuencia se activaron relaciones acordes con la ciencia escolar para las dimensiones establecidas, a medida que con la intervención se produjo un acercamiento progresivo hacia el crecimiento de los esquemas idiosincrásicos por la activación de más relaciones adecuadas que construyen significados deseables para los conocimientos científicos (conceptos, modelos, destrezas y estrategias) que fueron objeto de aprendizaje en la secuencia didáctica *Termodinámica Química*.

V.3.1.1. Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento *ER1, …, ER5*

Los apartados que vienen a continuación son cinco, y cada uno está dedicado a la descripción de un esquema de razonamiento (***ER1***, ***ER2***, ***ER3***, ***ER4*** y ***ER5***) activado por los alumnos de la muestra a lo largo de la fase de intervención.

Esquema *ER1*: *sistemas termodinámicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER1*** (***Sistemas termodinámicos***) que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación, esto es, el número de veces que los alumnos hicieron explícita cada relación en sus respuestas a las tareas de *Termodinámica Química*. En la última columna se listan los códigos (***Cód***) que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, representadas por el símbolo ***S***.

*Tabla 1: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento **Sistemas termodinámicos (ER1)**, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termodinámica Química*

RELACIÓN	*f*	Cód
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	95	***S01***
UNIVERSO consta de ENTORNO	58	***S02***
SISTEMA tiene MATERIA	89	***S03***
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	37	***S04***
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	40	***S05***
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	60	***S06***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	55	***S07***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	23	***S08***
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	69	***S09***
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	68	***S10***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	0	***S11***
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	0	***S12***
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	0	***S13***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	18	***S14***
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	18	***S15***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	0	***S16***
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	0	***S17***
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	6	***S18***
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	94	***S19***
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	7	***S20***
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	88	***S21***
FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	24	***S22***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	71	***S23***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	7	***S24***
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	62	***S25***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	61	***S26***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	59	***S27***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	0	***S28***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	***S29***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	71	***S30***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	62	***S31***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	12	***S32***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	52	***S33***
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	50	***S34***
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	52	***S35***
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	9	***S36***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	7	***S37***
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	53	***S38***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	12	***S39***
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	47	***S40***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	60	***S41***
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	12	***S42***
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	13	***S43***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	31	***S44***
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	0	***S45***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	27	***S46***
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	7	***S47***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	91	***S48***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	78	***S49***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	69	***S50***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	65	***S51***
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	29	***S52***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	61	***S53***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	60	***S54***
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	29	***S55***
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	7	***S56***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	25	***S57***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	53	***S58***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	47	***S59***

El esquema referencial de razonamiento ***sistemas termodinámicos*** se compone de 59 relaciones, y los estudiantes activaron 51; pero aunque se trate del mismo número de relaciones que en la fase previa, se constata un avance en la potencialidad interpretativa del conocimiento utilizado. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren al reconocimiento del sistema termodinámico (ya no tanto de su entorno) y a la determinación de los estados termodinámicos utilizando las funciones de estado que se pretendían introducir: las magnitudes termodinámicas principales energía interna, entalpía, entropía y energía de Gibbs. Además, hacen explícita en numerosas ocasiones la dependencia de estas variables del sistema con respecto a la composición del mismo.

Las 8 relaciones no activadas en el esquema referencial fueron objeto de aprendizaje en la unidad didáctica Termoquímica: la naturaleza intensiva de la presión, la definición de los sistemas abiertos y aislados. Ésta última, recordemos, solamente había sido utilizada por dos alumnas en una de las actividades de la fase previa (*Fp03*), y no se manifestó en ***Ci***; pero dado que los sistemas aislados, en la práctica, son una idealización cuyo estudio no ayuda a activar mejores esquemas del la ciencia escolar, la no activación de estas relaciones no supone una gran pérdida en información en la descripción y la interpretación de las características de los sistemas termodinámicos. En cuanto a la definición de sistemas abiertos, había tenido un gran éxito entre los alumnos en las pruebas de caracterización de la muestra, porque los estudiantes tendían a quedarse con la parte del sistema químico no gaseosa, que se *escapa* a la atmósfera, donde se mezcla con los gases del aire hasta no hacerse perceptible. La construcción del significado microscópico de la entropía como la variable que mide el desorden termodinámico de las partículas ayudó a los estudiantes a visualizar los gases *desprendidos* de los procesos químicos como constituyentes del sistema que, aunque se *liberen* a la atmósfera, proceden del sistema inicial, y los cambios que experimentan ayudan a comprender los aspectos energéticos de los procesos naturales. Así pues, la activación del elemento *composición química* del sistema y su vinculación con las magnitudes termodinámicas principales mediante la relación ***S49*** ha sido un éxito en ***Fi***.

Con respecto a la fase previa, la frecuencia de activación aumentó en el caso de las relaciones que tienden puentes hacia ***ER5*** (***S04***, ***S05***, ***S29***, ***S50*** y ***S52***) lo que demuestra el éxito de la metodología para promover la utilización de esquemas interpretativos de la ciencia escolar. Sin embargo, disminuyó en las demás relaciones, por la tendencia de los alumnos a describir menos los sistemas termodinámicos e interpretar en mayor profundidad los cambios que se experimentan como consecuencia de los procesos. Los resultados de los demás esquemas de acción confirman esta tendencia.

De las 59 relaciones del esquema referencial ***ER1***, 42 se encuadran en el dominio macroscópico de representación del conocimiento, y 17, en el microscópico.

Las respuestas de los alumnos a las actividades contienen las 17 relaciones microscópicas de ***ER1***, con una frecuencia de activación $f_{(micro)} = 643$ (casi comparable a la de la fase previa), un promedio de activación $\bar{x}_{(micro)} = 38$, y una desviación típica mucho menor que en ***Fp***: $\sigma_{(micro)} = 24$. Estos datos apuntan hacia el alcance de una profundidad interpretativa adecuada en la descripción de los estados termodinámicos de los sistemas materiales, porque, aunque las frecuencias de activación sean menores que en *Termoquímica*, antes eran 10 los alumnos asistentes, mientras que en la fase de intervención hubo 2 alumnas más (Berta y Adela) que apenas asistieron a las clases y de las que no se disponen resultados, por su negativa a facilitar los guiones de trabajo.

Los resultados de las relaciones macroscópicas confirman que no podemos caer en el optimismo a la hora de interpretar los resultados, pues $f_{(macro)} = 1657$, con un promedio de activación $\bar{x}_{(macro)} = 39$ y $\sigma_{(macro)} = 32$, resultados claramente inferiores a los de las actividades de *Termoquímica*.

Tomados en conjunto, los datos estadísticos citados indican que, para resolver las cuestiones planteadas en las actividades de la fase de intervención, los alumnos construyeron descripciones e interpretaciones macroscópicas, como es de esperar en el desarrollo de una unidad didáctica sobre Termodinámica Química. El descenso de la activación no parece deberse a un retroceso en el aprendizaje, sino a la elaboración de respuestas menos extensas y detalladas que en ***Fp*** (como se aprecia por la mayor brevedad de las manifestaciones escritas de los estudiantes) y al hecho de que las actividades de *Termodinámica Química* se centren más en el estudio de los aspectos dinámicos de los procesos naturales, lo que también influye en el descenso de la frecuencia de activación (no así en el número de relaciones activadas, que crece entre ***Fp*** y ***Fi***). En todo caso, habría sido deseable una $f_{(macro)}$ mayor, que revelaría un esfuerzo más intenso por parte de los estudiantes en la elaboración de descripciones sobre los estados de los sistemas termodinámicos.

El elevado valor de $f_{(micro)}$ se debe a la aceptación generalizada (véase la baja dispersión de los datos) de las relaciones microscópicas que permiten interpretar los sistemas sobre la base de los aspectos energéticos de las partículas: su disposición espacial, su movimiento (energía cinética de las partículas) y su dispersión energética, aunque los estudiantes apenas hagan uso de éste último concepto y prefieran focalizarse en el movimiento y la distancia entre partículas. El valor de $\sigma_{(macro)}$ es mayor que el de $\sigma_{(micro)}$, lo que refleja el éxito de la secuencia *Termodinámica Química* en la activación de relaciones del dominio microscópico por parte de la muestra en su conjunto.

De las 59 relaciones del esquema referencial ***Sistemas termodinámicos***, 16 eran ya familiares para los alumnos, por haberlas trabajado en cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación y sus correspondientes promedios para las

16 relaciones ya conocidas y las 43 relaciones nuevas (aprendidas en este curso, desde el comienzo de la fase previa), se obtienen promedios de activación bastante dispares: $f_{(no\ nuevas)} = 636$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 40$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 28$. Aunque la frecuencia de activación haya caído con respecto a ***Fp***, debido a la creciente inasistencia y a la tendencia a reducir al máximo las respuestas escritas, los estudiantes consolidaron la utilización de las ideas ya trabajadas en cursos anteriores en el ámbito de una disciplina nueva, la Termodinámica, y sus respuestas demuestran una mayor homogeneidad que anteriormente (la desviación típica cae de manera significativa). Los datos de las relaciones nuevas son $f_{(nuevas)} = 1664$, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)} = 39$, y $\sigma_{(nuevas)} = 30$. Así pues, aunque los valores de los tres parámetros estadísticos son menores que en ***Fp***, el alumnado no rechazó la utilización de las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones, y la dispersión de los datos es comparable a la de las relaciones trabajadas en los años pasados. La escasa diferencia entre los promedios de las frecuencias de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ y $\bar{x}_{(nuevas)}$ es un dato favorable a la utilidad de las actividades de *Termodinámica Química* en la construcción de un aprendizaje que pueda llegar a ser significativo.

En la tabla siguiente se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Sistemas termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química* que se implementaron en el aula. Recuérdese que *Fi16* no se llevó a cabo, por la excesiva dificultad que suponía para estos estudiantes la elaboración de una interpretación termodinámica de los procesos bioquímicos. Para que se pudiera realizar adecuadamente esta acitividad, conforme a los principios metodológicos descritos y aprovechando las oportunidades que brinda el diseño de las tareas con la finalidad de lograr una activación de las relaciones de la ciencia escolar, se necesitaría disponer de más tiempo para ayudar a los alumnos a construir unos conocimientos básicos sobre la composición y estructura química de las biomoléculas (en concreto, del ATP) y sobre las características de los procesos bioquímicos, así como las condiciones en las que tienen lugar en las células. Dado que no se disponía de tanto tiempo como sería deseable para estos propósitos, sobre la marcha hubo que decidir si se llevaría a cabo una implementación superficial de la actividad, o si resultaba más beneficioso para el aprendizaje sacrificar la realización de *Fi16* en favor de un repaso general de los conocimientos ya trabajados. En vista de que a aquellas alturas de curso la introducción de otra actividad conceptualmente muy demandante no motivaría a los alumnos ni serviría para mejorar sustancialmente los aprendizajes alcanzados (no más que un repaso de las ideas desarrolladas en clase), de común acuerdo con el profesor se optó por no implementar *Fi16*.

Los datos de la tabla se han organizado en las cinco columnas que se han descrito con detalle en el ***Capítulo III***:

En la primera columna se listan las quince actividades implementadas de la secuencia *Termodinámica Química*. La segunda columna recoge las frecuencias de activación *f* correspondientes a cada actividad, que indican la capacidad de las actividades para incentivar la activación de relaciones de un esquema dado. En la tercera columna se muestra el número de alumnos $A = (0,1,\ldots,11)$ que activaron al menos una relación correspondiente al esquema de razonamiento ***ER1***, indicador de la idoneidad de cada actividad para conseguir que distintos individuos utilicen relaciones de ***sistemas termodinámicos***. La cuarta columna contiene el número *R* de relaciones de ***ER1*** que se activaron, siendo $R = (0,1,\ldots,59)$. El significado de los indicadores *f*, *A* y *R* se detallaron en el ***Capítulo III***. En la quinta y última columna se exponen, entre paréntesis y separados por una coma, los valores de las duplas ***(min,máx)*** de activación, que muestran los números mínimo y máximo de relaciones activadas en cada actividad y por tanto ayudan a estimar la dispersión de los datos, en función de la amplitud del intervalo que cubren.

Tabla 2: activación de las relaciones del esquema de razonamiento sistemas termodinámicos (ER1) en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención ***(Fi)***

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Fi01	46	6	16	(0,16)
Fi02	*120*	*6*	*20*	*(20,20)*
Fi03	*150*	*6*	*25*	*(25,25)*
Fi04	105	7	16	(1,16)
Fi05	*322*	*7*	*46*	*(46,46)*
Fi06	80	8	15	(0,15)
Fi07	148	8	27	(0,27)
Fi08	*204*	*6*	*34*	*(34,34)*
Fi09	*162*	*6*	*27*	*(27,27)*
Fi10	162	6	35	(21,31)
Fi11	159	6	27	(12,26)
Fi12	121	6	23	(17,23)
Fi13	152	8	28	(0,28)
Fi14	199	8	32	(16,31)
Fi15	170	7	32	(7,31)

Aunque 10 alumnos se presentaron a las actividades (todos menos Débora, que solamente asistió a una sesión), fueron 8 los que entregaron los guiones de trabajo, así que el máximo valor de *A* es 8. Obsérvese que el número de estudiantes que realizaron las actividades de *Termodinámica Química* varió a lo largo de la fase de intervención, entre $A = 6$ y $A = 8$:

Débora había abandonado la asignatura, y solamente se presentó a clase en la sexta sesión de la fase de intervención, cuando ya se estaban realizando actividades de aplicación del segundo bloque de contenidos. La ausencia de Berta y Diana fue casi total, y ambas se negaron a entregar sus guiones de trabajo; por estas razones consideramos que estas dos alumnas, al igual que Débora, constituyen casos de muerte muestral. Alfonso faltó al desarrollo de *Fi08* y *Fi09* (indagación), así

como de *Fi10*, *Fi11*, *Fi12*; a éstas últimas tampoco asistió Adela, aunque al día siguiente, a exigencia del profesor, tanto Alfonso como Adela hicieron las actividades que tenían pendientes. Brais no se presentó el día de las actividades *Fi01*, *Fi02*, *Fi03*, ni el de *Fi15*, y dejó en blanco *Fi06* y *Fi07*, igual que Carlos, quien además tampoco fue a clase las sesiones en las que se implementaron *Fi08*, *Fi09*, *Fi10*, *Fi11*, *Fi12*, *Fp14* y *Fp15*. Benito se perdió *Fi04* y *Fi05*, pero cubrió el guion de trabajo de *Fi04* en su casa.

Los valores de *A* muestran que hay cuatro actividades en las que algún alumno se negó a trabajar y no utilizó ninguna relación de sus esquemas de razonamiento y acción: Benito en *Fi01*, Brais e Carlos en *Fi06* y *Fi07*, y otra vez Carlos en *Fi13*. En las 11 actividades restantes, todos los que realizaron las tareas propuestas activaron relaciones de ***ER1***.

Se resaltan en bastardilla los datos correspondientes a las actividades de indagación/reestructuración *Fi02*, *Fi03*, *Fi05*, *Fi08* y *Fi09*. Dado que en ellas los estudiantes no realizan manifestaciones escritas de las que se puedan vaciar las relaciones activadas, se estima cuántas relaciones han podido ser utilizadas por el alumnado: como máximo, aquéllas que se trabajan en el texto de la actividad. La reconstrucción ficticia de las relaciones que pudieron haber activado los alumnos en las actividades de indagación/reestructuración tiene por objetivo estimar la idoneidad de éstas para trabajar en el aula con las relaciones del esquema ***Sistemas termodinámicos***, comparando sus datos con los de las actividades de exploración que las anteceden y de aplicación que las suceden, de las cuales sí se dispone de valores de activación. Estos datos estimados no se utilizan para elaborar los esquemas idiosincrásicos de los alumnos si el análisis de las demás actividades no confirma con seguridad la validez de la asignación.

Al comparar los valores de *f*, *R* y *(min,máx)* que se han adjudicado a las actividades de indagación/reestructuración, y los valores obtenidos en las actividades de exploración y de aplicación correspondientes, se observa que los valores de *f* y *R* correspondientes a *Fi02*, *Fi03*, *Fi05*, *Fi08* y *Fi09* son significativamente superiores a los de sus actividades inmediatamente anteriores y posteriores. Es decir, en las actividades de aplicación, los alumnos activan un número inferior de relaciones de *ER1* que el que se ha adjudicado a las actividades de indagación inmediatamente anteriores. Sin embargo, hacia el final de la unidad didáctica, la activación de relaciones se acerca a los valores *R* de *Fi08* y *Fi09*, y estos resultados permiten inferir que los alumnos que realizaron las actividades de indagación tardaron en activar todas (o prácticamente todas) las relaciones de ***ER1*** que se habían trabajado, pero llegaron a hacerlo en una extensión razonable. En cuanto a los valores de las duplas *(min,máx)*, los mínimos obtenidos son en general bajos o nulos, lo que confirma que continuó en el tiempo la creciente dicotomización de la muestra que se ha comentado en el ***Capítulo III***. La gran dispersión indica que

algunos de los alumnos lograron una buena activación de relaciones del esquema ***ER1*** en las actividades de indagación, mientras que otros activaron bastantes menos relaciones; las actividades con menor intervalo en las duplas son *Fi10* y *Fi12*, de la triada sobre la calcinación de la piedra caliza, actividades que llamaron la atención de los alumnos por la espectacularidad de la reacción química, la significatividad del proceso y las sustancias químicas implicadas, y la integración entre los cálculos numéricos y la interpretación del significado y las implicaciones de los mismos.

Sin embargo, no son estas actividades las que logran la máxima eficacia en la activación, según los indicadores *f* y *R*. Las que condujeron a una mayor utilización de relaciones de ***Sistemas termodinámicos*** son, con diferencia, *Fi05* y *Fi08*, pero estos valores son estimaciones y no deben interpretarse como resultados fiables hasta haberlos confirmado. Las siguientes en activación son las tres últimas de la secuencia didáctica, lo que confirma la inferencia que se realizó en el párrafo anterior: a medida que se realizaban las actividades, los alumnos fueron construyendo poco a poco las relaciones de ***ER1***, y se necesitaron varias actividades para lograrlo. Sin embargo, la utilización de esquemas más completos no se tradujo, a diferencia de lo que sucedió en la fase previa, en menor dispersión de los datos.

La actividad que menos relaciones ayudó a activar fue, con diferencia sobre las demás, *Fi01*, porque los alumnos tuvieron grandes dificultades para comprender que la evaporación del agua es un proceso endotérmico. Ni el planteamiento de la cuestión *B* ni las "pistas" que les dio Rodrigo sobre la sensación térmica de la evaporación del agua (y otros líquidos) sobre la piel, parecieron ayudarles a relacionar sus observaciones con los aspectos energéticos del proceso. Al responder primero la cuestión *A*, adjudicaron de inmediato una $\Delta H < 0$ a la evaporación, proablemente porque están acostumbrados a realizar esta asignación por defecto sobre la base de su experiencia cotidiana: en Física y Química, todos o casi todos los procesos son exotérmicos, y vienen acompañados de grandes emisiones de energía, con diferentes manifestaciones perceptibles más o menos espectaculares: luz, sonido, incremento de temperatura, etc. Puede que influya también la idea alternativa, bastante extendida, de que solamente los procesos exotérmicos tienen un *verdadero* valor de ΔH asociado; en las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica* se comentaron brevemente algunos procesos endotérmicos, pero no se trabajaron en profundidad, porque precisamente se esperaba hasta el comienzo de la fase de intervención para poner en duda la idea de que los procesos espontáneos son aquéllos en los que los sistemas minimizan su cantidad de energía. Es posible que esta concepción alternativa estuviera implícita en los estudiantes al principio de la fase de intervención, aunque, como se comentará a lo largo de este apartado y los siguientes, se superó con la realización de las actividades de *Termodinámica Química*.

Tampoco *Fi06* logró una gran activación de las relaciones de ***ER1***, por ser la primera actividad en la que los alumnos tenían que aplicar sus modelos de

partículas, enlace y reacción química para predecir los valores de ΔS asociados a distintos procesos químicos. A la vista de los modelos iniciales del dominio microscópico, estos datos de activación no sorprenden.

En el siguiente apartado se discuten estas cuestiones sobre la base de los esquemas idiosincrásicos de los alumnos.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Sistemas termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos de los alumnos. En ellos, las variables y los subesquemas se representan mediante etiquetas, unidas por nexos de línea continua que simbolizan las relaciones adecuadas (de la ciencia escolar). Como se ha indicado, los elementos y las relaciones representativas de la ciencia escolar que no se activan, se muestran de color gris, y los elementos y relaciones alternativas se ilustran con líneas punteadas y letra cursiva.

Los esquemas se han categorizado en diferentes niveles y subniveles. En ella, las relaciones activadas acordes con la ciencia escolar se señalan con el símbolo ✓ y las inadecuadas, con un ✖. El símbolo 💣 distingue aquellas relaciones que se activaron inadecuadamente al principio de la fase de intervención y pasaron a activarse conforme a las ideas científicas a medida que se realizaban más actividades. En realidad, estas relaciones podrían haberse marcado con el símbolo de relación activada (✓), porque el resultado que se observa al final de la fase de intervención es que el alumno habría demostrado utilizarlas adecuadamente. La utilidad de 💣 es informar al lector de que las relaciones señaladas eran alternativas en un principio, pero evolucionaron progresivamente a lo largo del proceso de aprendizaje hacia la ciencia escolar. Todas las tablas análogas a ésta siguen la misma clave de símbolos.

La categorización de los esquemas en niveles y subniveles se basa, como en los ***Capítulos*** anteriores, en el análisis de las diferencias que existen entre los distintos esquemas idiosincrásicos y el referencial representativo de la ciencia escolar. Los niveles en los que se encuadran los esquemas correspondientes a la fase de intervención se denominan niveles x (x_1, x_2, …, siendo x_1 el esquema más alejado del referencial de la ciencia escolar). Su división en subniveles señala la existencia de estructuras similares, pero diferentes, dentro del mismo nivel de ordenación. Los subniveles de la fase de intervención se rotulan como x_{1a}, x_{1b}, …; x_{2a}, x_{2b}, …; siendo los subniveles a los más alejados del referencial dentro de cada nivel.

La ordenación de los esquemas idiosincrásicos en niveles y subniveles sirve para estudiar de manera cualitativa la evolución que se produjo en el aprendizaje de cada individuo de la muestra.

En la clasificación de los 8 esquemas idiosincrásicos correspondientes a la fase de intervención de la investigación (sin tener en cuenta los datos de Berta,

Diana y Débora, como en el ***Capítulo IV***), se han establecido cuatro niveles de ordenación, de x_1 a x_4, en orden de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar. El nivel x_3 está subdividido en dos subniveles.

Tabla 3: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER1, sistemas termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	x_4				x_3		x_2	x_1	-		
					x_{3b}	x_{3a}					
ALUMNOS	**Ana**	**Brais**	**Clara**	**Darío**	**Adela**	**Alfonso**	**Carlos**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
UNIVERSO consta de ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA tiene MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓			
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	✓			
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			

A continuación se describen los esquemas ***ER1*** prototípicos de cada nivel de ordenación, y se comentan las características que explican su categorización en los niveles $ER1_{Fi} = [x_1,\ldots,x_4]$. Poco hay que comentar de la construcción de este esquema de razonamiento, porque prácticamente todas las relaciones de la ciencia escolar se habían construido a lo largo de la fase previa a la intervención, y los datos que se presentan aquí solamente confirman que la construcción de dichos ***ER1*** fue efectiva a corto plazo.

Nivel $ER1_{Fi} = x_4$: esquemas *ER1* de Ana, Brais, Clara y Darío

En este nivel se categorizan los cuatro esquemas de razonamiento más cercanos al referencial de la ciencia escolar.

Se observa que los cuatro alumnos activaron todos los elementos (subesquemas y variables) relevantes para la resolución de las cuestiones planteadas; de hecho, utilizaron las 51 relaciones de la ciencia escolar que se activaron a lo largo de la fase de intervención, y no parecieron tener dificultades en ello. Pero estos buenos resultados solamente indican que los alumnos consolidaron las relaciones que se habían construido en ***Fp***. De hecho, el esquema de Brais está en el nivel más cercano a la ciencia escolar (a pesar de que realizó un trabajo muy pobre en la fase de intervención) a la larga llegó a contruir 5 relaciones más que en ***Fp***, alguna más que otros compañeros. Pero en general hay muy pocas diferencias entre los esquemas ***ER1*** de ***Fp*** y ***Fi***, porque casi todas las relaciones del referencial de la ciencia escolar se construyeron a lo largo de la secuencia *Termoquímica*, y las nuevas se refieren al reconocimiento de las magnitudes entropía y energía de Gibbs como variables termodinámicas del sistema, y al significado de la entropía como estimador de la ***probabilidad*** de los estados termodinámicos (***S56***), en correspondencia con los ***microestados de energía*** (***S20***); pero estas dos relaciones solamente se activaron en *Fi05* (actividad de indagación). Sí tuvo un auténtico éxito

la construcción de ***S55***, referida a la relación entre la *entropía* y el ***desorden termodinámico*** de los sistemas, entendido como distribución espacial y energética de las partículas.

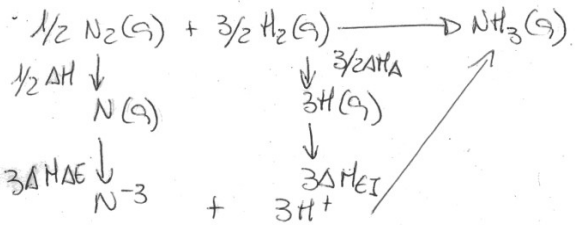
Nivel $ER1_{Fi} = x_3$: subniveles $ER1_{Fi} = x_{3b}$ (Adela) y $ER1_{Fi} = x_{3a}$ (Alfonso)

Este nivel incluye los esquemas de dos alumnos de la muestra, cada uno en un subnivel diferente para indicar las diferencias entre ambos, que, con respecto a los ***ER1*** de sus compañeros, se alejan del referencial en una sola relación:

Subnivel $ER1_{Fi} = x_{3b}$: esquema ***ER1*** de Adela

Esta alumna tuvo dificultades para distinguir la naturaleza de las partículas que componen los sistemas materiales. En la última actividad de la intervención, por ejemplo, estaba convencida de que los gases nitrógeno e hidrógeno se ionizan para reaccionar y generar amoníaco, e incluso dibujó el ciclo de Born-Haber correspondiente al proceso.

[Adela, Fi15(1)]:



(...)

Subnivel $ER1_{Fi} = x_{3a}$: esquema *ER1* de Alfonso

En el esquema de razonamiento de Alfonso no se activó la relación que establece el significado de la ***pared*** termodinámica como límite del sistema; por lo demás, consolidó las relaciones de la ciencia escolar que había contruido en ***Fp***, e incluyó la *entropía* y la *energía de Gibbs* como magnitudes termodinámicas válidas para la caracterización de los estados del sistema. Manifestaciones como las que se ofrecen a continuación ilustran sus ideas:

[Alfonso, Fi12(x)]: (...) Se este proceso se producira coa expulsión á atmosfera dos gases, a Presión sería a mesma que a da atmosfera (...)

[Alfonso, Fi14(x)]: (...) Explota porque pola reacción producese de sólido a gas e o gas é moito ~~mais~~ menos denso

Nivel $ER1_{Fi} = x_2$: esquema de Carlos

El semi-absentismo de Carlos y su escaso afán de trabajo le dificultaron la puesta en práctica de algunas relaciones ya trabajadas en la fase previa, y no llegó a

reconocer la energía de Gibbs como una magnitud termodinámica para estudiar los estados del sistema. A diferencia de sus compañeros, no expresó que conviene definir los sistemas objeto de análisis como sistemas cerrados, que no intercambian materia con el entorno, y no hizo explícita la idea de que la cantidad de materia no varía en los procesos químicos. Como Alfonso, tampoco activó ***S18***. En la fase de intervención, las ausencias de Carlos se hicieron más notorias, y ya no se limitaron a llegar tarde a las clases a primeras horas de la mañana, sino que se ausentó a 5 de las 8 sesiones de la unidad didáctica *Termodinámica Química*. Su compañera de grupo, Clara, ya no contaba con él para el trabajo diario, y como en G_D faltaban Débora y Diana, Darío (G_D) y ella (G_C) formaron grupo permanente, al que a veces se sumaba Benito, que progresivamente se fue quedando solo en G_B por la ausencia de Berta y por el mutismo de Brais, que se había enfadado con Benito porque éste no le dejaba copiar las tareas. En otras ocasiones, Benito trabajaba con G_A, donde el ambiente era más colaborativo y contaba con la complicidad de Alfonso, quien ayudaba a sus compañeras de grupo, pero se relacionaba de manera más distendida con Benito.

Nivel $ER1_{Fi} = x_1$: : esquema de Benito

El ***ER1*** de este alumno es el más incompleto de la muestra, porque Benito no estuvo presente a la sesión en la que se desarrolló el significado microscópico de la entropía, así que podemos estimar que no construyó ***S20*** ni ***S36***, aunque, como en el caso de sus compañeros, se trata de una estimación teórica, que quedaría pendiente de confirmación hasta disponer de los resultados de las caracterizaciones final y de retención. Dado que sus respuestas son bastante escuetas en cuanto a las relaciones que se supone ya dominaba con fluidez, no expresó la naturaleza extensiva del volumen ni la intensiva de la temperatura, aunque es posible que no las olvidara desde el final de ***Fp***.

En particular, utilizó la variable volumen en varias actividades, para interpretar los cambios que se producen en las características físicas de los sistemas que experimentan los procesos propuestos:

[Benito, Fi11(x)]: No proceso a densidade varía, xa que a mais volume menos densidade

[Benito, Fi14(1)]: A que coa súa combustión obtéñense productos que ocupan moitísimo mais volume, e ó ser instantaneo, crea a onda expansiva

Esquema *ER2: procesos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER2*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron durante la fase de intervención de la investigación. En la tabla siguiente se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***P***.

Tabla 4: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento procesos termodinámicos (ER2), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termodinámica Química

RELACIÓN	*f*	Cód
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	93	*P01*
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	6	*P02*
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	6	*P03*
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	40	*P04*
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	79	*P05*
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	40	*P06*
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	12	*P07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	6	*P08*
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	40	*P09*
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	6	*P10*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	12	*P11*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	6	*P12*
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	6	*P13*
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	13	*P14*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	6	*P15*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	6	*P16*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	9	*P17*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	66	*P18*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	38	*P19*
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	41	*P20*
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	12	*P21*
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	12	*P22*
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	19	*P23*
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	19	*P24*
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P25*
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*P26*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	28	*P27*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	26	*P28*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	25	*P29*
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	0	*P30*
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	1	*P31*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	0	*P32*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	44	*P33*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	29	*P34*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	25	*P35*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	20	*P36*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	21	*P37*
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	68	*P38*
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	68	*P39*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	25	*P40*
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	28	*P41*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	17	*P42*
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	19	*P43*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	13	*P44*
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	12	*P45*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	0	*P46*
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	0	*P47*

PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	12	*P48*
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	12	*P49*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	12	*P50*
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	12	*P51*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	0	*P52*
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	0	*P53*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	29	*P54*
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	22	*P55*
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	0	*P56*
CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P57*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	41	*P58*
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	41	*P59*
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	0	*P60*
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	*P61*

El esquema referencial de razonamiento ***procesos termodinámicos*** se compone de 61 relaciones, y los datos muestran que los estudiantes activaron 49, dos menos que en la fase previa. El resultado es aceptable, si se tienen en cuenta dos afirmaciones: en primer lugar, que ***ER2*** apenas contiene relaciones que no se hubieran trabajado ya, y, en segundo lugar, que se trata de un esquema más descriptivo que interpretativo, cuando en las actividades de *Termodinámica Química* predomina la interpretación más que la descripción de los procesos, a diferencia de lo que sucede con la unidad de *Termoquímica*. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren al reconocimiento de los ***procesos termodinámicos*** como evoluciones de los ***sistemas materiales***, que tienen un ***sentido*** determinado, implican unas ***transferencias de energía*** y suceden en unas ***condiciones*** determinadas. Así pues, se construyó una caracterización bastante completa de las transferencias energéticas, aunque ésta ya no se encamina hacia las relaciones que convierten el *calor* y el *trabajo* en los procesos por los que los sistemas materiales intercambian con su entorno; estos mecanismos permanecen en segundo plano, mientras que la cantidad de energía intercambiada pasa a cuantificarse mediante las variaciones de las variables termodinámicas principales del sistema, a excepción de la energía de Gibbs, cuya variación los alumnos apenas reconocen como estimadora de la cantidad de *trabajo útil* involucrado en los procesos. La construcción del significado de ΔG no fue tan completa como sería deseable, debido a las limitaciones que suponía desarrollar relaciones tan abstractas en tan poco tiempo y partiendo de conocimientos iniciales bastante fragmentarios.

Así pues, de las 12 relaciones del ***ER2*** referencial que no se activaron, la ausencia que resta más capacidad interpretativa es la que se acaba de comentar; los alumnos tampoco utilizaron las relaciones sobre el calor específico y el calor latente, porque no se pedía explícitamente en las actividades. Tampoco clasificaron los procesos termodinámicos como isotérmicos o adiabáticos (como ya había sucedido en la fase previa). Dado que estas relaciones no tienen una gran importancia en el referencial ***Procesos termodinámicos***, se puede considerar que por no activarlas no habrá grandes pérdidas de capacidad descriptiva e interpretativa de los esquemas. Destaca positivamente la construcción de las relaciones que vinculan la *variación de entropía* con la ***degradación de la energía*** (***S37***) y la concepción de los procesos

cíclicos como procesos en los que las variaciones de las funciones de estado son nulas, idea que los alumnos no llegan a expresar directamente, pero que demuestran dominar en sus análisis de los dos sentidos posibles de los procesos. Desde la unidad didáctica de *Termoquímica*, pues, se amplían ligaramente los esquemas ***ER2***, y sobre todo refuerzan las relaciones del elemento ***sucesión de estados termodinámicos*** y la atención a las condiciones de temperatura en las que tienen lugar los procesos; estas relaciones tienen un valor promedio de frecuencia de activación por alumno y actividad que es superior en ***Fi***.

De las 61 relaciones del referencial ***ER2***, 56 se encuadran en el dominio macroscópico de representación del conocimiento, y las restantes 5 pertenecen al dominio microscópico o establecen alguna conexión directa con él. Los estudiantes activaron solamente una de ellas a lo largo de la fase de intervención (la definición de las reacciones químicas como procesos termodinámicos), con una frecuencia de activación $f_{(micro)} = 41$; el promedio de activación $\bar{x}_{(micro)} = 8$ y la desviación típica $\sigma_{(micro)} = 18$, al referirse a una sola relación, no aporta información útil. Nuevamente, los alumnos prefirieron centrar sus interpretaciones microscópicas en el análisis de las partículas y sus interacciones que en la articulación de un modelo más completo de proceso químico, aunque en ***Fi*** el modelo de reacción química es significativamente más avanzado que al principio de la fase experimental de la investigación. Sin embargo, las relaciones puente con ***ER2***, que integran la descripción macroscópica de los procesos con su interpretación microscópica, no es todo lo robusta que cabría esperar para el nivel de 2º de Bachillerato. Un resultado positivo es que las actividades de *Termodinámica Química*, como las de *Termoquímica* sirvieron para ayudar a los alumnos de la muestra a construir razonamientos basados en el estudio comparativo de diferentes estados del sistema, y en su cuantificación mediante las magnitudes termodinámicas. Las relaciones macroscópicas de ***ER2*** tienen un valor de $f_{(macro)} = 1202$, bastante inferior al de *Termoquímica*, con un promedio de activación aceptable, si se tiene en cuenta que ocho de estas relaciones no se activaron: $\bar{x}_{(macro)} = 21$, y con una desviación típica comparable a la media, lo que tampoco sorprende ($\sigma_{(macro)} = 21$).

De las 61 relaciones del referencial ***procesos termodinámicos***, 24 eran ya conocidas de cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación f y los correspondientes promedios de activación para estas relaciones y las 37 nuevas, se obtienen los siguientes datos: $f_{(no\ nuevas)} = 702$, de nuevo más baja que en ***Fp***. El promedio de activación es $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 29$, y desviación típica baja a mayor ritmo que la media y la frecuencia: $\sigma_{(no\ nuev\langle s)} = 25$; y $f_{(nuevas)} = 540$, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = 15$ y $\sigma_{(nuevas)} = 16$. Estos datos indican que los estudiantes no rechazaron la utilización de las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones, aunque la utilización de las ya conocidas sigue siendo más frecuente. Se observa que después de ***Fp*** se produce una consolidación de las ideas

ya trabajadas sobre los procesos termodinámicos, y aunque los datos de activación son menores, los de las relaciones nuevas están más cerca de los de ***Fp*** que los de las ya conocidas, en lo que no indica una tendencia a la amplicación de los ***ER2*** (que ya eran bastante completos al final de *Termoquímica*) sino una revalorización de las relaciones nuevas frente a las ya trabajadas en cursos pasados. Este proceso de refuerzo de los esquemas de razonamiento no es banal, si se tiene en cuenta que al comienzo de la fase previa los estudiantes tuvieron que superar bastantes dificultades para activar relaciones que en teoría debían ya manejar con soltura, y que faltaban entre cuatro y cinco meses para los exámenes de Selectividad.

En la tabla siguiente se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***procesos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades implementadas de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Tabla 5: activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***procesos termodinámicos (ER2)*** *en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Fi01	27	6	9	(0,9)
Fi02	*90*	*6*	*15*	*(15,15)*
Fi03	*108*	*6*	*18*	*(18,18)*
Fi04	85	7	15	(1,13)
Fi05	*168*	*7*	*24*	*(24,24)*
Fi06	24	8	4	(0,4)
Fi07	63	8	11	(0,11)
Fi08	*234*	*6*	*39*	*(39,39)*
Fi09	*150*	*6*	*25*	*(25,25)*
Fi10	55	6	15	(7,12)
Fi11	36	6	7	(4,7)
Fi12	54	6	10	(8,10)
Fi13	38	8	7	(0,7)
Fi14	67	8	14	(6,11)
Fi15	44	7	9	(7,9)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, con un número de asistentes que varió entre $A = 6$ y $A = 8$. Alfonso faltó al desarrollo de *Fi08* y *Fi09* (indagación), así como de *Fi10*, *Fi11*, *Fi12*; a éstas últimas tampoco asistió Adela, aunque al día siguiente, a exigencia del profesor, tanto Alfonso como Adela hicieron las actividades que tenían pendientes. Brais no se presentó el día de las actividades *Fi01*, *Fi02*, *Fi03*, ni el de *Fi15*, y dejó en blanco *Fi06* y *Fi07*, igual que Carlos, quien además tampoco fue a clase las sesiones en las que se implementaron *Fi08*, *Fi09*, *Fi10*, *Fi11*, *Fi12*, *Fp14* y *Fp15*. Benito se perdió *Fi04* y *Fi05*, pero cubrió el guion de trabajo de *Fi04* en su casa.

En cuatro actividades de la secuencia, alguno de los alumnos no utilizó ninguna relación de sus esquemas de razonamiento y acción: fueron Benito en *Fi01*, Brais e Carlos en *Fi06* y *Fi07*, y otra vez Carlos en *Fi13*. En las 11 actividades restantes, todos los que realizaron las tareas activaron relaciones de ***ER2***.

Como sucedió en ***Fp***, el número de relaciones activadas es significativamente menor para ***ER2*** que para ***ER1***, tanto en los valores de *f* como en los de *R*. En el ***Capítulo III*** ya se indicaron las dos causas de estos resultados: la tendencia de los alumnos a explicitar menos las relaciones de tipo descriptivo o clasificativo (***ER2***) que las identificativas o explicativas/justificativas (***ER1***), y la prioridad que dieron en sus razonamientos a las relaciones que permiten describir e interpretar distintos estados del sistema, frente a las que describen los procesos físicos y químicos en sí. Esta interpretación se confirma al comparar los indicadores *f*, *R* y *(min,máx)* adjudicados a las actividades de indagación *Fi02*, *Fi03*,*Fi05*, *Fi08* y *Fi09* (señaladas con letra bastardilla), y los correspondientes valores de las actividades de exploración y de aplicación. Se activaron, en promedio, bastantes menos relaciones de ***ER2*** de las que se trataron en las actividades de indagación. Pero el perfil de activación ha cambiado con respecto a ***Fp***: antes seguía una clara tendencia ascendente hasta la primera mitad de la secuencia de actividades, y descendente después, mientras que en ***Fi*** tiende a mantenerse constante desde las primeras actividades a las últimas, porque los esquemas ***ER2*** idiosincrásicos apenas crecieron en número de relaciones entre ***Fp*** y ***Fi***, como era de esperar: los estudiantes ya habían construido esquemas bastante completos en *Termoquímica*. Así pues, y como no sentían la necesidad de activar un gran número de relaciones descriptivas si eran capaces de generar interpretaciones más completas sobre la dinámica de los procesos (activación de ***ER3***), la descripción de los procesos no mejoró significativamente a lo largo de ***Fi***, y el número de relaciones de ***ER2*** se mantuvo constante en aquellas relaciones que los estudiantes consideraban más útiles para describir los procesos termodinámicos. En resumen, desde el principio de la unidad didáctica *Termodinámica Química*, relegaron ***ER2*** a favor de ***ER3***, para ofrecer respuestas más breves a las actividades.

Si se analizan los valores de las duplas *(min,máx)*, se observa que prácticamente en todas las actividades cubren intervalos amplios, aunque parece que se reducen hacia el final de la secuencia, cuando los estudiantes ya habían transferido sus ideas a varios fenómenos, situaciones y contextos diferentes. Otra vez se observa la dicotomización, indicativa de los problemas actitudinales de alumnos como Brais o Carlos. Como ya sucedió en *Termoquímica*, a diferencia de los resultados de ***ER1***, los datos del esquema ***procesos termodinámicos*** muestran diferencias significativas entre los máximos estimados para las actividades de indagación y los máximos de las correspondientes actividades de aplicación, así que incluso los alumnos que más relaciones de ***ER2*** utilizaron, no pusieron en juego todas las relaciones trabajadas en las actividades de indagación. Los valores de *f* y *R*

señalan que las actividades que condujeron a una mayor activación de relaciones de ***Procesos termodinámicos*** son las de indagación, y las que menos, *Fp06*, *Fp10*, *Fp11* y *Fp13*, todas ellas de aplicación. Estos resultados confirman la interpretación que acabamos de perfilar: cuando los alumnos no exploraban conocimientos nuevos de la ciencia escolar, sino que se trataba de transferirlos, preferían obviar la descripción de los procesos. Las descripciones más completas que elaboraron no iban encaminadas a caracterizar de manera exhaustiva los procesos termodinámicos, sino a desarrollar por escrito las ideas que más les costaba conectar. Más que auténticas descripciones, se trata de breves apuntes que sirven de recordatorio de ideas difíciles o poco consolidadas, y, por lo tanto, dignas de recoger por escrito.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***ER2***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Procesos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de razonamiento idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente. Los niveles *x* de ordenación de los ***ER2*** idiosincrásicos son cinco, de x_1 a x_5 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para el nivel x_5.

Tabla 6: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER2, procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	x_5				x_4	x_3	x_2	x_1	-		
	x_{5b}		x_{5a}								
ALUMNOS	**Ana**	**Benito**	**Darío**	**Brais**	**Clarai**	**Adela**	**Alfonso**	**Carlos**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓			
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	·	✓	✖	✓	·			
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

MATERIA											
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	✓	✓	✓	✓	✖	💣	✖	💣			
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·			
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	✓	✓	✓	✓	✖	✓	✓	✓			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	✓	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES											
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS											

A continuación se describen los esquemas ***ER2*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $ER2_{Fi} = [x_1, \ldots, x_5]$.

Nivel $ER2_{Fi} = x_5$: subniveles x_{5b} y x_{5a}

Subnivel x_{5b}: esquemas de Ana, Benito y Darío

En el nivel más acorde con el referencial de la ciencia escolar, se encuentran los esquemas ***ER2***, idénticos, de tres alumnos que activaron todos los elementos más relevantes para la resolución de las cuestiones planteadas. Los esquemas no contienen los valores *procesos isotérmicos* y *procesos adiabáticos*, como había sucedido en ***Fp*** (aunque el potencial interpretativo de los razonamientos no se resiente significativamente por ello). Tampoco se activaron las relaciones sobre el *calor latente* y el *calor específico*, ni la dependencia de las ***transferencias de energía*** con respecto al ***camino termodinámico***, ni dos definiciones: las *disoluciones* y el *trabajo útil*. A pesar de que Ana y Benito habían demostrado en ***Fp*** un concepto embrionario de esta noción. Sí se activaron los elementos específicos de la secuencia sobre Termodinámica Química: la *variación de entropía* y la *variación de energía de Gibbs*, y los esquemas ***ER2*** son bastante completos al final de la fase de intervención.

Ninguno de los tres alumnos de este subnivel demostró tener grandes dificultades para activar las relaciones de la ciencia escolar, aunque la utilización del lenguaje científico sí presentó algunas lagunas:

[Ana, Fi04(x)]: (…) Para que o barco puidese empregar ese sistema, a auga do mar tería que quentarse e para iso necesítase un motor ou un combustible fósil. Ademais, a auga tería que volver ó mar na temperatura na que se atopa a auga do mar, que non é posible se a auga que entra se quenta.

[Benito, Fi07(x)]: Cando diminúe a entropía dunha cousa aumenta a de outra. (…)

[Darío, Fi12(1)]: Que a rocha calcaria ao estar sometida a altas temperaturas, vaise desintegrando e vai liverando CO_2, e vaise formando cal viva.

Subnivel $ER2_{Fi} = x_{5a}$: esquema de Brais

El esquema de este alumno solamente tiene una relación menos que los ***ER2*** de sus compañeros del subnivel x_{5a}: Brais no utilizó ni explícita ni implícitamente la idea de que los procesos termodinámicos cíclicos se caracterizan por tener variaciones nulas de las funciones de estado. Sus respuestas son muy breves y deja bastantes cuestiones sin contestar, pero parece tener las ideas claras a la hora de describir los procesos termodinámicos conforme a las ideas de la ciencia escolar. Las expresa de manera verbal si se trata de relaciones ya trabajadas en ***Fp***:

[Brais, Fi14(1)]: Porque a partir dun mol de sólido consigues moitos moles de gas, a reacción é exotérmica e moi rápida.

No demostró tanta seguridad en la verbalización de las relaciones que se presentaron a lo largo de la fase de intervención, y prácticamente sólo las desarrolló mediante los cálculos propuestos en las actividades.

Nivel $ER2_{Fi} = x_4$: esquema de Clara

En este nivel se encuentra el esquema de una única alumna, Clara, que no llegó a superar la concepción alternativa del calor y el trabajo como *formas de energía*.

[Clara, Fi14(2)]: Un sistema o que aplicandolle unha pequena enerxía en forma de Q obteríase unha gran enerxía en forma de W (a onda expansiva e o aumento de presión).

Por lo demás, su ***ER2*** es bastante completo y pone en juego las nociones de variación de entropía y variación de energía de Gibbs para estudiar la evolución de los sistemas que experimentan procesos físicos o químicos.

Nivel $ER2_{Fi} = x_3$: esquema de Adela

Con respecto a los esquemas de sus compañeros, el esquema de esta alumna contiene algunas ideas alternativas:

No hizo explícito que los *estados intermedios* son aquellos comprendidos entre los *estados inicial y final* del sistema, aunque puede que conceptualizó que los ***procesos termodinámicos*** no consisten en un salto inmediato de aquél a éste. De sus manifestaciones no se puede afirmar que supiera que las ***variaciones de las funciones de estado*** son nulas en un *proceso cíclico*, y estableció etapas inadecuadas para la reacción química de la síntesis de Haber (*Fi15*).

En la tabla se señaliza con un 💣 la relación ***P19***, para simbolizar los obstáculos a los que se enfrentó Adela en la construcción del concepto de calor como un proceso de transferencia energética. No parecía encontrarse cómoda utilizando esta noción, porque apenas la puso en juego. Sin embargo, describe sin problemas magnitudes físicas más significativas para ella, y distinguió claramente las condiciones en las que tienen lugar los procesos:

[Adela, Fi14(1)]: Además tendriamos un ΔV bestial puesto que de 1 mol de TNT se obtendrian (más o menos) 8 moles los cuales habria que multiplicar por 22'4 l (sa) obteniendo así un incremento de volumen enorme

[Adela, Fi07(1)]: Como el $H_2O_{(l)}$ tiene mayor desorden que la solida podemos deducir que $\Delta S < 0$

Nivel $ER2_{Fi} = x_2$: esquema de Alfonso

Este alumno tiene un esquema bastante menos completo que el de sus compañeros. No utilizó en sus descripciones las variaciones de presión y volumen

para describir los procesos termodinámicos, no reconoció las transferencias de materia y su concepto de transferencia energética incluía una noción inadecuada del calor. Además, sus descripciones son superficiales, no distiguieron etapas en los procesos ni definió claramente que los sistemas siguen un camino termodinámico entre el estado inicial y el final cuando experimentan transformaciones; sí describió estados intermedios, pero sin hacer explícita su integración en una noción de proceso claramente delimitado por un estado inicial y otro final. Reconoció que el sistema cambia entre dos estados, pero no identificó claramente este cambio entre estados como un proceso; para él, un proceso parece más bien un cambio entre dos sutiaciones o circunstancias. El sistema evoluciona pasando por distintos estados, y el proceso, cambiando de circunstancias.

[Alfonso, Fi04(x)]: Non é posible xa que a auga non pode entrar no barco e cederlle o calor. Con isto non é posible producir enerxía xa que a auga non se vai quentar ó entrar no barco. Para isto faría falta combustible. Ademais a auga non pode facer un traballo sobre o barco.

[Alfonso, Fi11(1)]: Non porque a rocha calcaria non ten as mesmas condicións a unha temperatura que a outra

Sus descripciones no son muy precisas, y continúan salpicadas de incoherencias en la expresión y errores de concordancia:

[Alfonso, Fi01(x)]: (…) Para un se un proceso é espontaneo haberia que mirar a entropia do universo

[Alfonso, Fi10(x)]: Eu equivoqueime nas formulas e calculei a ΔS^{o} de todos os reactivos e o usei a temperatura para calculalas, despois sido calculei a ΔG de todo. (…)

Nivel $ER2_{Fi} = x_1$: esquema de Carlos

Éste es, sin duda, el ***ER2*** más alejado de la ciencia escolar. En cuanto a ideas alternativas, no se detectan grandes obstáculos al aprendizaje, salvo la pugna por establecer el concepto científico de calor (que también mantenían Clara, Adela y Alfonso). Pero Carlos no expresó que las variaciones de las funciones de estado son no nulas en los procesos cíclicos y que la energía se conserva en las transferencias entre el sistema y el entorno, y no terminó de describir las condiciones de presión constante y volumen constante.

Como en ***Fp***, sus manifestaciones giran en torno a la importancia de las explicaciones del profesor, que son cruciales para el cambio de ideas… pero nunca se describen; quizá en ***Fi*** se observa algo más de empeño por su parte en aclarar a qué conceptos se refieren las intervenciones de Rodrigo:

[Carlos, Fi04(x)]: Explicouse o proceso no cal o barco non pode funcionar, xa que non se usa nin enerxía nin calor.

Sus manifestaciones escritas son muy breves y las ideas se vuelcan en ellas de manera deslavazada; por ello, y por sus continuas inasistencias, que en ***Fi*** llegan a 5 sesiones de un total de 8, no resulta extraño que el esquema ***ER2*** de Carlos sea el más incompleto de la muestra.

Esquema *ER3*: *aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER3*** de los alumnos, con las correspondientes frecuencias de activación *f* y los códigos ***Cód*** mediante los que se describen las relaciones del esquema, representadas por el símbolo ***A***.

Tabla 7: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3), extraídas de las actividades de la unidad Termodinámica Química

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	12	***A01***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	3	***A02***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	63	***A03***
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	24	***A04***
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	0	***A05***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	18	***A06***
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	4	***A07***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	38	***A08***
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	3	***A09***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	5	***A10***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	4	***A11***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	91	***A12***
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	79	***A13***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	17	***A14***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	92	***A15***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	46	***A16***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	33	***A17***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	30	***A18***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	27	***A19***
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	21	***A20***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	91	***A21***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	65	***A22***
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	46	***A23***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	67	***A24***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	51	***A25***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	20	***A26***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	60	***A27***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	59	***A28***

VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	49	***A29***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	28	***A30***
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	17	***A31***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	3	***A32***
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	14	***A33***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	15	***A34***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	15	***A35***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	12	***A36***
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	13	***A37***
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A38***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	68	***A39***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	12	***A40***
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	0	***A41***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	24	***A42***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	1	***A43***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	56	***A44***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	5	***A45***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	50	***A46***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	48	***A47***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	30	***A48***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	27	***A49***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO ($dG < 0$)	27	***A50***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" ($dG = 0$)	6	***A51***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO ($dG > 0$)	27	***A52***

De las 52 relaciones que componen el esquema referencial de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, los alumnos de la muestra activaron 49 en la fase de intervención, frente a las 27 de la fase previa. Las 3 relaciones no activadas son las siguientes:

En primer lugar, no se hizo explícito que el ***balance energético*** no determina la ***espontaneidad del proceso***, aunque es posible que los alumnos lo hayan interiorizado, porque todos reconocieron que la *variación de entalpía* del sistema no es un criterio válido para conocer la ***espontaneidad***. Sin embargo, a la vista de las ideas alternativas y dificultades de aprendizaje que se han detectado en la literatura del área en relación con la interpretación de los aspectos energéticos de los procesos naturales, se ha optado por no realizar la asignación por defecto a ***A05*** salvo que los estudiantes aludieran literalmente al balance energético de las transferencias por calor a presión constante, lo que en ninguna de las actividades hicieron. Las otras dos relaciones no activadas establecen la justificación científica de la ***irreversibilidad de los procesos***: ésta se debe a que el *trabajo útil* que se puede realizar está limitado por el mecanismo de ***degradación de la energía***.

Algunas de las relaciones de mayor frecuencia son las mismas que en ***Fp***, sobre el vínculo entre el ***sentido del proceso*** y la ***evolución del sistema***, y el estudio de ésta utilizando las *variaciones de las magnitudes termodinámicas*; pero ahora las más citadas ya no figura la *variación de presión*, aunque la de la *energía interna* (implícitamente) y la de la *entalpía* (explícitamente) se siguen utilizando con para estudiar los procesos termodinámicos. Además, entre las más utilizadas aparece una

nueva relación que no se activó en ***Fp***: la que establece el concepto de ***espontaneidad de un proceso***.

El número de relaciones de ***ER3*** que se encuadran en el dominio macroscópico de representación del conocimiento es de 48 sobre el total de 52, y los alumnos activan las 4 que establecen alguna conexión con los modelos microscópicos. La frecuencia de activación f de las relaciones microscópicas es $f_{(micro)} = 16$ (aproximadamente un tercio de la frecuencia correspondiente a ***Fp***) con un promedio de activación bajo: $\bar{x}_{(micro)} = 4$ y una desviación típica también baja: $\sigma_{(micro)} = 1$. Pero las relaciones macroscópicas tienen $f_{(macro)} = 1600$, algo superior a la activación de ***Fp***, con el mismo valor promedio $\bar{x}_{(macro)} = 33$ y una desviación típica significativamente menor: $\sigma_{(macro)} = 26$. Se puede relacionar el descenso en la dispersión de los datos, al menos en parte, al hecho de que en la fase de intervención se han activado prácticamente todas las relaciones de ***ER3***, cuando en ***Fp*** solamente se esperaban alrededor de la mitad; para comprobar hasta qué punto los alumnos otorgaron a este esquema una mayor importancia en la elaboración de interpretaciones, en los párrafos siguientes recurrimos a los demás estimadores.

El promedio de activación de las relaciones microscópicas es bajo, porque los alumnos prefirieron construir sus justificaciones y predicciones apelando a las relaciones teóricas sobre el movimiento de las partículas y su relación con la energía de las mismas, la temperatura, el estado de agregación y la composición química (***ER5***), y no tanto a las cuatro relaciones microscópicas de ***ER3***, que se refieren a la formación y ruptura de enlaces entre partículas. Los estudiantes se sintieron cómodos utilizando la variación de entropía, a la que apelaron en 59 ocasiones: 21 veces en relación con la degradación de la entropía (definición macroscópica, en ***ER2***) y 29 veces en relación con un cambio en el desorden termodinámico del sistema (***ER1***). Así pues, consideraron que la variación de la entropía del sistema es una propiedad importante en el estudio dinámico de los procesos por estar ligada a la distribución de la energía interna entre las partículas. Sin embargo, de la variación de energía de Gibbs se construyó una concepción más utilitaria, como el balance o compromiso entre el término entálpico y el término entrópico en la ecuación fundamental de la Termodinámica, teniendo en cuenta la temperatura a la que tiene lugar el proceso.

Entre la ruptura y la formación de enlaces químicos apenas se observan diferencias de activación, si bien las frecuencias son tan bajas que no permiten una interpretación más refinada, y habría de esperarse a las caracterizaciones final y de retención para averiguar cómo se han integrado estas ideas en los esquemas de razonamiento del alumnado.

De las 52 relaciones de *aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*, solamente 8 eran conocidas para el alumnado, mientras que las relaciones nuevas sumaban un total de 44. Los parámetros de activación se enumeran a continuación:

$f_{(no\ nuevas)}$ = **178**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ = **22** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ = **15** (todos los estimadores caen a la mitad); y $f_{(nuevas)}$ = **1438**, con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)}$ = **33**, ligeramente superior al de ***Fp***, y con $\sigma_{(nuevas)}$ = **28** (muy inferior). Así pues, los estudiantes aceptaron y utilizaron las relaciones nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones sobre los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, y aunque no abandonaron las ya conocidas, tendieron a utilizarlas menos, a favor de las recién construidas. La frecuencia de las relaciones nuevas es el triple en ***ER3*** (44 relaciones) que en ***ER2*** (37), pero los promedios de activación ya no son son similares, sino que el de ***ER3*** duplica el de ***ER2***: $f_{(nuevas,ER3)}$ = **1438** frente a $f_{(nuevas,ER2)}$ = **540**, y $\bar{x}_{(nuevas,ER3)}$ = **33** frente a $\bar{x}_{(nuevas,ER2)}$ = **15**. Estos datos demuestran una buena efectividad de las actividades de *Termodinámica Química* para activar relaciones conceptuales sobre la caracterización de los procesos termodinámicos, a través de los cambios que suceden en las magnitudes termodinámicas básicas y principales, éstas últimas utilizadas como cuantificadores de los distintos aspectos energéticos asociados a los procesos.

En la tabla siguiente se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, para cada una de las 15 actividades implementadas de *Termodinámica Química*.

Tabla 8: activación de las relaciones del esquema de razonamiento aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3) en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Fi01	51	6	17	(0,17)
Fi02	*132*	*6*	*22*	*(22,22)*
Fi03	*144*	*6*	*24*	*(24,24)*
Fi04	*77*	*7*	16	(9,13)
Fi05	*196*	*7*	*28*	*(28,28)*
Fi06	36	8	6	(0,6)
Fi07	101	8	22	(0,21)
Fi08	*102*	*6*	*17*	*(17,17)*
Fi09	*90*	*6*	*15*	*(15,15)*
Fi10	99	6	28	(10,21)
Fi11	114	6	21	(17,21)
Fi12	73	6	15	(10,14)
Fi13	116	8	24	(0,23)
Fi14	159	8	31	(10,26)
Fi15	126	7	28	(17,23)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, con un número de asistentes que varió entre A = 6 y A = 8. Fueron cuatro las actividades de la secuencia en las que al menos uno de los alumnos no utilizó

ninguna relación de sus esquemas de razonamiento y acción: Benito en *Fi01*, Brais e Carlos en *Fi06* y *Fi07*, y otra vez Carlos en *Fi13*. En las 11 actividades restantes, todos los que realizaron las tareas activaron relaciones de ***ER3***.

Al comparar los datos de esta tabla con los que se recogen en las correspondientes a *ER2* y *ER1*, se observa que los valores estimados de manera teórica para las actividades de indagación de ***ER3*** son superiores a las de ***ER2*** al comienzo de la secuencia didáctica pero inferiores más adelante; al mismo tiempo, también las frecuencias de activación que corresponden a las actividades de exploración y aplicación (de las que se disponen manifestaciones escritas del alumnado) son significativamente más altas en ***ER3*** que en ***ER2***. Estos resultados permiten afirmar que los estudiantes dieron bastante más importancia a reconstruir los detalles dinámicos del proceso (***ER3***) que a describir los cambios sucedidos en el sistema (***ER2***), continuando con la tendencia interpretativa que se observó en la segunda mitad de la secuencia de actividades sobre Termoquímica. Así pues, las actividades de la secuencia *Termodinámica Química* fueron útiles para la elaboración de interpretaciones dinámicas sobre los procesos naturales. Al comparar las frecuencias de activación adjudicadas a las actividades de indagación con las de las correspondientes actividades de exploración y de aplicación, se confirma esta suposición: en la segunda mitad de la unidad didáctica, las *f* no son sustancialmente diferentes, así que se llegaron a activar prácticamente todas las relaciones tratadas en las actividades de indagación. No se llegaron a construir todas las relaciones para las que está diseñada *Termodinámica Química*, porque en la actividad *Fi05* se presentaron una serie de ideas sobre Termodinámica Estadística que los alumnos no llegarían a utilizar en sus respuestas. Sin embargo, estos resultados no se deben considerar un fracaso sino una limitación a la velocidad del aprendizaje, impuesta por los escasos conocimientos iniciales de los estudiantes y por la necesidad de consolidar primero unos esquemas ***ER3*** que permitan elaborar razonamientos fundamentados en la mecanística de los procesos y no en aspectos estocásticos.

Los valores de los indicadores *f*, *R* y *(min,máx)* de ***ER3*** a lo largo de la secuencia *Termodinámica Química* revelan un progresivo crecimiento en el número de relaciones activadas (valores de *R*) y en las frecuencias de activación (valores de *f*), que adoptan sus valores máximos hacia el final de la secuencia; la excepción en la tendencia creciente de la primera mitad de las actividades es *Fi06*, actividad de aplicación enfocada exclusivamente a que los estudiantes se familiaricen con la noción de desorden termodinámico, que es muy abstracta, conceptualmente demandante, y sobre la cual se han detectado numerosas ideas alternativas. Desde *Fi08* no se observan pérdidas apreciables en la activación, con la excepción de *Fi12*, actividad cuyo perfil es más descriptivo que interpretativo (lo que explica la menor activación de ***ER3***, unido al pequeño pico de frecuencia que se observa en ***ER2***). Todos estos datos permiten inferir que los estudiantes avanzaron significativamente en la activación de relaciones de *ER3*, y que, para la mayoría, las relaciones sobre la

dinámica de los procesos químicos adquirieron una gran utilidad en la construcción de razonamientos argumentativos; esto explica las altas frecuencias de activación que se mantuvieron desde el momento en que se interiorizaron las relaciones recién trabajadas, a pesar de los obstáculos de tipo actitudinal.

Las duplas *(min,máx)* fueron cubriendo intervalos cada vez menos amplios a medida que se avanzaba en la realización de las actividades, con la excepción de *Fi14*, en la que las dificultades relacionadas con el establecimiento de las estructuras químicas de las sustancias explosivas supusieron un obstáculo en la elaboración de interpretaciones de la ciencia escolar. La dicotomización de la muestra se percibe en los valores *min* = 0 de aquellas actividades en las que algunos alumnos, aun asistiendo a la sesión de clase, dejaron en blanco el guion de trabajo, y en que los máximos obtenidos por estimación para *Fi02*, *Fi06*, *Fi10* y *Fi11* no son sustancialmente diferentes de los máximos que expresaron los alumnos en las subsiguientes actividades de aplicación. La presencia simultánea de esta tendencia en ***ER1*** y ***ER3*** confirma la dicotomización de la muestra, aunque también señala que incluso los alumnos que activaron menos relaciones, realizaron un aprendizaje de las principales relaciones conceptuales deseables. A la vista de estos datos, la secuencia *Termodinámica Química* tuvo éxito en la construcción de esquemas de la ciencia escolar para la interpretación de los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos.

Las actividades que más ayudaron a activar relaciones de ***aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** son *Fi02*, *Fi03* y *Fi05* (indagación), seguidos de las tres últimas actividades (de aplicación), cuyas *f* son ligeramente inferiores, pero tienen valores de *R* comparables o superiores a los de estimación de las actividades de indagación. Las que condujeron a una menor activación fueron *Fi01* (primera actividad), *Fi06* (por la poca variedad de relaciones que se trabajan, en aras de la consolidación de un concepto científico de desorden termodinámico) y *Fi12*, más descriptiva que interpretativa. Así pues, se confirma que los alumnos otorgaron un gran poder descriptivo e interpretativo a las relaciones que tratan los aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, y que la tendencia a la activación de esquemas ***ER3***, de gran potencialidad interpretativa, fue en aumento a lo largo de la secuencia didáctica, en lo que demuestra un aprendizaje efectivo de la ciencia escolar a corto plazo. En el ***Capítulo VII*** se explora hasta qué punto estos aprendizajes realizados fueron significativos (estables en el tiempo).

En el siguiente apartado se discuten estas cuestiones sobre la base de los esquemas idiosincrásicos de los alumnos.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, se elaboraron los ***ER3*** idiosincrásicos de los alumnos, que

después se clasificaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

Los niveles *x* de ordenación de los ***ER3*** idiosincrásicos son cuatro, de x_1 a x_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para x_3 y para x_4.

Tabla 9: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER3, aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	x_4		x_3				x_2	x_1	-		
	x_{4b}	x_{4a}	x_{3b}			x_{3a}					
ALUMNOS	**Alfonso**	**Adela**	**Alfonso**	**Benito**	**Clara**	**Darío**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	✓			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	✓	✓	✓	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	✓	·	·	·	✓	✓	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	✓	·	✓	✓	✓	·	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	✓	✓	·	·	✓	✓	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	✓	✓	✓	·	·	·	·			
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	✓	·	·	·	·	·	·	·			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	✓	✓	·	✖	✓	✖	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO (dG < 0)	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" (dG = 0)	✓	✓	·	·	✓	✓	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO (dG > 0)	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓	·			

Los esquemas ***ER3*** prototípicos de cada nivel se comentan a continuación.

Nivel $ER3_{Fi} = x_4$: subniveles $ER3_{Fi} = x_{4b}$ y $ER3_{Fi} = x_{4a}$

Éste es el nivel más acorde con la ciencia escolar, y en él se incluyen los esquemas de dos alumnos, Alfonso y Adela, ambos del grupo G_A. En el subnivel inmediatamente inferior a estos dos está Ana, del mismo grupo de trabajo, en lo que parece apuntar hacia un efecto positivo de la cooperación grupal en el aprendizaje de la ciencia escolar.

Subnivel $ER3_{Fi} = x_{4b}$: esquema ***ER3*** de Alfonso

Del referencial de la ciencia escolar, este alumno solamente ha dejado de activar las tres relaciones que no se activaron en toda la secuencia, y las dos que hacen referencia al rendimiento del proceso, solamente utilizadas por tres alumnos: Adela, Ana y Benito. Así pues, aunque en el seno de su grupo se discutieron estas

dos relaciones, Alfonso no las incluyó en sus materiales escritos, probablemente por no considerarlas de utilidad inmediata. Por lo demás, este alumno activó todos los subesquemas y variables relevantes para la resolución de las cuestiones planteadas, incluida ***A43***, que solamente él utilizó.

En cuanto a las dificultades para construir las ideas de ***ER3***, parece que no se presentaron grandes obstáculos, aunque la sistematización de las manifestaciones escritas seguía siendo una tarea pendiente para este estudiante, como se aprecia en el siguiente ejemplo:

[Alfonso, Fi14(2)]: Con contacto coa calor, rompense os enlaces, co que os reactivos se expanden de forma violenta e se produce a explosión

[Alfonso, Fi14(x)]: Todos os explosivos modernos teñen a común que todos ligeran $N_{2\ (g)}$. Na formación do $N_{2\ (g)}$, prodúcese un triple enlace que libera gran cantidade de enerxía

A reacción é exotérmica e o tempo de reacción é moi curto

Explota porque pola reacción producese de sólido a gas e o gas é moito ~~mais~~ menos denso

Subnivel $ER3_{Fi} = x_{4a}$: esquema ***ER3*** de Adela

Aunque Adela sí activó el elemento ***rendimiento del proceso***, no completó la interpretación de los mecanismos microscópicos de ruptura y formación de interacciones, y no relacionó la energía de Gibbs con el estado de equilibrio (ni con el trabajo útil). Al comienzo de la fase de intervención manifestó dudas sobre cuál de las dos palabras se utilizaba para indicar la liberación neta de energía al entorno, si "exotermia" o "endotermia", y tuvo ciertas dificultades para relacionar la variación de temperatura con el cambio en la energía interna del sistema. Recuérdese que los razonamientos iniciales de Adela sobre los valores numéricos de las magnitudes físicas y sobre la naturaleza de las mismas eran bastante pobres.

Por ejemplo, en *Fi01* tuvo problemas con la terminología. Creía que la palabra "endotérmico" se asociaba a una variación de entalpía negativa, pero no estaba segura de ello, y aceptó sin reflexionar la idea de Ana: la evaporación del agua es un proceso endotérmico. Anotó esta afirmación, y le atribuyó una variación de entalpía de signo negativo. Inmediatamente relacionó el signo con una liberación de energía al entorno, por lo que predijo que la evaporación del agua vendría acompañada de un aumento de temperatura ¡en el entorno! Parece que la relación alternativa entre la temperatura y la energía (interna) de un sistema se superó en las actividades siguientes, y que solamente se debía a la aceptación dogmática de los criterios de signos, sin detenerse a razonar si sus predicciones encajan o no con las observaciones cotidianas.

En *Fi07*, después de discutir con Ana, se mantuvo en sus trece al afirmar que un proceso en el que se absorbe energía es "exotérmico":

[Adela, Fi01(1)]: Al dejar agua en un vaso esta se evapora siendo asi un proceso espontáneo y endotermico. (…) ΔH < 0 (…) Calor, ya que desprenderia energía

[Adela, Fi07(x)]: Al congelarse el agua sabemos que absorve energia con lo que podemos decir que es exotermico.

Nivel $ER3_{Fi} = x_3$: subniveles $ER3_{Fi} = x_{3b}$ y $ER3_{Fi} = x_{3a}$

Aquí se incluyen los esquemas de cuatro alumnos, Alfonso y Adela, organizados en dos subniveles.

Subnivel $ER3_{Fi} = x_{3b}$: esquemas ***ER3*** de Alfonso, Benito y Clara

En cuanto al esquema de Ana, no aludió a la formación de interacciones en los procesos químicos, sino solamente a la ruptura de las mismas, y no utilizó la variación de la energía de Gibbs del sistema como criterio de equilibrio.

Benito, por su parte, no llegó a relacionar la relación entre la espontaneidad de un proceso y la consecución del estado de equilibrio, y en *Fi15* intentó calcular la temperatura óptima para la realización de proceso Born-Haber a partir de la condición de equilibrio $\Delta G = 0$, que en dos ocasiones había reconocido explícitamente como tal. Al igual que Ana, solamente consideró la ruptura de interacciones químicas, pero no la formación de enlaces.

Clara no hizo mención a la relación cinética por la que se define el tiempo que duran los procesos, ni relacionó la endotermia con la ruptura de interacciones; aunque sí relacionó la exotermia con la formación de interacciones, se ha decidido no realizar la asignación ausente para ***A06*** porque la literatura ha puesto de manifiesto que los modelos energéticos de enlace químico que utilizan los estudiantes no siempre mantienen una coherencia en sus afirmaciones. Además, al principio de la fase de intervención, En *Fi10*, Clara tuvo problemas para establecer que el signo negativo de ΔG se asocia a la espontaneidad de los procesos; pero parece que esto se debió a sus problemas para trabajar con valores numéricos. Aunque siempre utilizó el convenio de signos adecuado para la temperatura expresada en Kelvin, al estudiar la ecuación fundamental de la Termodinámica se olvidaba por completo de estos aspectos teóricos y analizaba el proceso de manera algorítmica: al disminuir la temperatura, como el término entrópico es negativo, la variación de energía de Gibbs se hace "más negativa", es decir, "aumenta", y por lo tanto "o proceso invírtese e vólvese espontáneo".

Subnivel $ER3_{Fi} = x_{3a}$: esquema de Darío

Darío solamente consideró la formación de interacciones en los procesos químicos, no la ruptura, probablemente por considerar que la liberación de energía

al entorno indica que el sistema tiene mucha energía interna, lo que hace que el proceso pueda seguir adelante (sea espontáneo). En *Fi15(1)* confundió la variación de entropía con la variación de entalpía, aunque después las identificaría adecuadamente, y no llegó a hacer explícita la utilización del criterio científico sobre el estado de equilibrio, por problemas en el estudio de los signos de la ecuación fundamental de la Termodinámica.

$ER3_{Fi} = x_2$: esquema *ER3* de Brais

Brais no llegó a activar algunas de las relaciones que articulan el núcleo interpretativo de ***ER3***: desde el punto de vista macroscópico, no utilizó el concepto de irreversibilidad ni la relación entre la espontaneidad y la degradación de la energía, ni el estado de equilibrio. Además, no activó ninguna de las cuatro relaciones del dominio microscópico. Sus respuestas son superficiales, y parece que su intención es centrarse en la aplicación de algoritmos para llegar a un resultado numérico; pero en varias de las actividades no llega a desarrollar tampoco los algoritmos o realiza solamente parte de los cálculos, lo que no le permite ni llegar al resultado numérico. Los obstáculos actitudinales determinaron que el aprendizaje de Brais no llegara más allá de la intención, no siempre resuelta, de colocar ecuaciones y encajar unos datos con otros hasta despejar un valor incógnito.

Nivel $ER3_{Fi} = x_1$: esquema de Carlos

Es el más alejado de la ciencia escolar, pues se caracteriza por la misma superficialidad que el de Brais, pero sin siquiera llegar a utilizar la variación de la energía de Gibbs del sistema como pieza clave en la resolución de cálculos. El único desarrollo algebraico que recogió en sus manifestaciones escritas, lo copió del encerado durante la puesta en común en gran grupo (en *Fi13*).

Esquema ER4: Dinámica de los procesos químicos

Se presentan los esquemas de razonamiento de *Dinámica de los procesos químicos* que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, los subesquemas y las relaciones que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento *Dinámica de los procesos químicos* de los alumnos, y se indica la frecuencia de activación ***f*** y el código ***Cód*** de identificación las relaciones de ***ER4***, representadas por el símbolo ***D***.

Tabla 10: *frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento* ***Dinámica de los procesos químicos (ER4)****, extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termodinámica Química*

RELACIÓN	*f*	Cód

PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	92	*D01*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	92	*D02*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	73	*D03*
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	28	*D04*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	6	*D05*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	6	*D06*
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	27	*D07*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	27	*D08*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	92	*D09*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	32	*D10*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	6	*D11*
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	6	*D12*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	6	*D13*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	7	*D14*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	6	*D15*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	6	*D16*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	20	*D17*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D18*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	14	*D19*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	20	*D20*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	13	*D21*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	6	*D22*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	25	*D23*
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	1	*D24*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	16	*D25*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	16	*D26*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	13	*D27*
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	7	*D28*
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	7	*D29*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D30*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	25	*D31*
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	9	*D32*
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	9	*D33*
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	4	*D34*
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D35*
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D36*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	17	*D37*
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	12	*D38*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	12	*D39*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	12	*D40*
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	12	*D41*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	12	*D42*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	12	*D43*

De las 43 relaciones que componen el esquema referencial, los alumnos de la muestra activaron 39 (casi el doble que en ***Fp***). Las relaciones que aparecen con mayor frecuencia son, nuevamente, las que definen la Termoquímica como la parte de la Termodinámica que se encarga de estudiar los aspectos energéticos de los

procesos químicos, y la Termodinámica Química como la parte de la Termodinámica que analiza los aspectos dinámicos de los procesos atendiendo a la evolución de los sistemas y sus causas. También tienen elevada frecuencia de activación las relaciones que se refieren a las leyes de la Termoquímica y al segundo principio de la Termodinámica (en ***Fp*** era el primero el más utilizado), aunque los estudiantes no llegaron a fundamentarlo desde el punto de vista microscópico en relación con el desorden termodinámico de los sistemas materiales. La utilización de la ecuación fundamental de la Termodinámica es aceptable, aunque para distinguir hasta qué punto los alumnos detallaron su significado microscópico, se ha asignado por defecto la no activación de la relación ***D24*** salvo que se citara explícitamente la energía cinética de las partículas a la hora de justificar la espontaneidad de los procesos químicos. Así, ***D24*** solamente se considera activada una vez a lo largo de la intervención, a pesar de que los estudiantes utilizaron la definición de la temperatura absoluta en 13 ocasiones.

Apenas se activan relaciones sobre el Equilibrio Químico, y, en cuanto a la Cinética Química, los conceptos de tiempo y velocidad aparecen con la misma frecuencia, y aunque no se utilizan los conceptos termodinámicos para estudiar los aspectos cinéticos de los procesos químicos, no se puede afirmar con seguridad que activaran esta relación (***D30***): otra vez los alumnos ciñeron sus razonamientos al ámbito de la Termodinámica Clásica, sin entrar apenas en las demás disciplinas de la Dinámica. Obsérvense las frecuencias de activación de las dos relaciones del elemento *Termodinámica Estadística*: solamente se activaron en la actividad de indagación *Fi05*, sin que los alumnos llegaran a utilizarlas de manera más o menos autónoma. En las caracterizaciones final y de retención, las ideas estadísticas no aparecerían.

De todos estos datos se infiere que las actividades de *Termodinámica Química* han tenido éxito en la construcción de esquemas de razonamiento adecuados sobre la concepción de la Termodinámica Química como disciplina científica, porque el número de relaciones activadas es el doble que en ***Fp***. El análisis de las frecuencias es el siguiente:

El esquema de razonamiento ***ER4*** presenta seis relaciones que tienen alguna vinculación con el dominio microscópico de representación del conocimiento, y se activaron 5 de ellas, aunque con valores bajos: $f_{(micro)} = 25$, con promedio $\bar{x}_{(macro)} = 4$ y una desviación típica $\sigma_{(macro)} = 3$. Las 37 relaciones macroscópicas tienen un valor de $f_{(macro)} = 781$ (inferior al de la fase previa), con promedio de activación $\bar{x}_{(macro)} = 21$ y una desviación típica baja, debido a la construcción de las relaciones nuevas (de hecho, las frecuencias no han caído mucho desde la secuencia *Termoquímica*): $\sigma_{(macro)} = 25$.

Solamente 3 relaciones de *Dinámica de los procesos químicos* eran conocidas para los estudiantes, y los parámetros de activación son $f_{(no\ nuevas)} = 43$ (casi se

triplica desde ***Fp***), con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 14** (elevado), sin que el aumento en las frecuencias hicera crecer la desviación típica de manera significativa: $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 9**. Así pues, a medida que los alumnos completaban una visión de la Termodinámica Química como disciplina científica, utilizaban más las relaciones que ya conocían de años pasados. Los resultados de las 40 relaciones nuevas son: $f_{(nuevas)}$ **= 763** (caen desde ***Fp***) con promedio de activación de $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 19** (moderadamente bajo) y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 19**, la mitad que en la fase previa. Estos datos estadísticos indican que la mayoría de los estudiantes construyeron esquemas aceptables de la ciencia escolar a lo largo de la intervención en el aula, sobre la base de las relaciones ya conocidas y ampliando los esquemas de razonamiento mediante la introducción de ideas de la Física y la Química modernas.

En la tabla siguiente se recoge información sobre la activación de las relaciones de *Dinámica de los procesos químicos*, para cada una de las 15 actividades implementadas de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Tabla 11: activación de las relaciones del esquema de razonamiento Dinámica de los procesos químicos (ER4) en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Fi01	12	6	4	(0,4)
Fi02	*78*	*6*	*13*	*(13,13)*
Fi03	*102*	*6*	*17*	*(17,17)*
Fi04	74	7	12	(2,12)
Fi05	*105*	*7*	*15*	*(15,15)*
Fi06	36	8	6	(0,6)
Fi07	23	8	4	(0,4)
Fi08	*36*	*6*	*6*	*(6,6)*
Fi09	*66*	*6*	*11*	*(11,11)*
Fi10	24	6	7	(2,6)
Fi11	55	6	9	(2,9)
Fi12	22	6	4	(3,4)
Fi13	51	8	13	(0,12)
Fi14	61	8	11	(4,11)
Fi15	58	7	13	(8,12)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, con un número de asistentes que varió entre $A = 6$ y $A = 8$.

Comparando los resultados de *ER4* con los esquemas de razonamiento anteriores, se observa que la activación de ***Dinámica de los procesos químicos*** es inferior a la de *ER1*, *ER2* y *ER3*; en algunos casos, la baja activación que hicieron los alumnos para ***ER2*** hace que los datos de este esquema y de ***ER4*** se parezcan. Al comparar solamente las actividades de indagación, para las cuales los indicadores *f*, *R* y *(min, máx)* son estimaciones de la cantidad de relaciones deseables, se observa

que hacia el final de la secuencia didáctica se llegaron a igualar los parámetros de las actividades de indagación y los de las últimas actividades de aplicación, que son las de realización más autónoma. Estos datos apuntan hacia una construcción más lenta que en ***Fp***, pero efectiva, de las relaciones de ***ER4*** a lo largo de *Termodinámica Química*. El hecho de que se necesitara más tiempo que en *Termoquímica* para construir las nuevas relaciones no sorprende, porque los constructos de ésta son menos abstractos y menos conceptualmente demandantes, y se circunscriben a la Física Clásica, macroscópica, mientras que la Termodinámica Química, más moderna, se basa en la aplicación de los modelos microscópicos y en conceptos y métodos de la Estadística.

No se observan diferencias en la dicotomización de la muestra con respecto a lo ya comentado para los demás esquemas de razonamiento. Los valores máximos en el perfil de activación se agrupan en dos pequeñas series, la primera en torno a las actividades de indagación *Fi02*, *Fi03* y *Fi05*, y la segunda en las últimas actividades de aplicación. La utilización de los algoritmos relacionados con la ecuación fundamental de la Termodinámica no parecen haber afectado sustancialmente a los datos de activación, en lo que parece indicar que la consolidación de las relaciones de razonamiento también se puede realizar a través de la integración con las estrategias de acción que utilizan los científicos para tratar los datos sobre los sistemas y procesos, y obtener resultados en el marco de los modelos y teorías de la Ciencia. Los valores máximos de las duplas coinciden en la mayoría de las actividades con el número total *R* de relaciones activadas, lo que indica que la secuencia *Termoquímica* ayudó a algunos estudiantes a activar esquemas de razonamiento acordes con las ideas de la ciencia escolar; sin embargo, la secuencia de actividades no tuvo un éxito generalizado en su propósito de lograr una evolución de los esquemas iniciales del alumnado sobre la Dinámica de los procesos físicos y químicos, porque los alumnos que construyeron esquemas ***ER4*** más fragmentarios (Brais e Carlos) no aprovecharon la cantidad de tiempo suficiente que les habría permitido integrar sus conocimientos científicos y sobre la Ciencia; así pues, al final de la intervención en el aula, estos dos chicos mantenían una visión limitada de los constructos de los que se vale la Dinámica para estudiar los procesos físicos y químicos.

Promovieron mejor activación de relaciones las actividades de indagación *Fi03*, e *Fi05*, seguidas de las tres últimas actividades de aplicación, cuando los alumnos ya habían dispuesto de tiempo suficiente para construir sus esquemas ***ER4***. Es cierto que, en principio, las últimas actividades tienen una mayor potencialidad de activación de los esquemas ***ER4***, porque introducen constructos de la Cinética Química y del Equilibrio Químico. Pero los alumnos no desarrollaron estas ideas en profundidad y se ciñeron a las de Termodinámica Química, en las que alcanzaron una activación aceptable. Como conclusión, destacamos que la consolidación de los nuevos conocimientos conceptuales y procedimentales pemitió a los alumnos

ampliar sus visiones sobre la Dinámica de los procesos físicos y químicos con las actividades de aplicación.

Las actividades que condujeron a una menor activación de relaciones fueron *Fi01* (la primera y, por lo tanto, aquélla en la que los estudiantes no habían interaccionado aún con la propuesta de enseñanza de manera significativa), *Fi06* (centrada en la aplicación del concepto de desorden) y *Fi12* (ésta, de aplicación, pero de perfil más descriptivo y menos interpretativo, por lo que las acciones que se requieren para realizarla tienen un nivel menor de planificación e integración de razonamientos procedentes de distintos ámbitos del conocimiento).

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Dinámica de los procesos químicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER4*** de los alumnos, que se categorizaron en los niveles y subniveles que se muestran en la tabla siguiente. Los niveles *x* de ordenación de los ***ER4*** idiosincrásicos son cuatro, de x_1 a x_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido dos subdivisiones para x_4 y tres para x_3.

*Tabla 12: relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento **ER4**, Dinámica de los procesos químicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	x_4		x_3				x_2	x_1	-		
	x_{4b}	x_{4a}	x_{3c}	x_{3b}	x_{3a}						
ALUMNOS	**Ana**	**Adela**	**Clara**	**Darío**	**Alfonso**	**Benito**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	·			
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	·	✓	✓	·	✓			
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	·	✓	✓	·	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	·			

CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	✓	✓	·	✓	·	✓	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓			
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	✓	✓	·	✓	✓	✓	✓	·			
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	✓	✓	·	✓	✓	✓	✓	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	✓	✓	·	·	✓	·	·	·			
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

A continuación se describen los esquemas ***ER4***, comentando las características por las que se categorizaron en los niveles $\boldsymbol{ER4}_{Fi} = [x_1, \ldots, x_4]$.

Nivel $ER2_{Fi} = x_4$: subninveles x_{4b} y x_{4a}

Subnivel x_{4b}: esquema de Ana

Nuevamente, los dos alumnos (en este caso, alumnas) que activan los esquemas más completos de la ciencia escolar pertenecen al grupo G_A; su compañero Alfonso, que tendía a trabajar con menor intensidad que ellas y prefería interaccionar con Benito, a medida que éste se iba quedando sin colaboradores en

G_B, se quedó un nivel *x* por detrás en la categorización de su ***ER4***, en el mismo subnivel que Benito.

El esquema de Ana contiene todas las ideas de la ciencia escolar que se activaron a lo largo de la intervención, lo que indica que esta alumna aprovechó adecuadamente las oportunidades para construir una imagen de la Termodinámica que se puede considerar aceptable, teniendo en cuenta que las limitaciones de tiempo y de conocimientos iniciales no permitieron desarrollar todos los contenidos que se pretendía (aunque sí los básicos, que permiten cubrir los objetivos que se han marcado para la unidad didáctica sobre Termodinámica Química).

Subnivel x_{4b}: esquema de Adela

La única relación que Adela no activó, en comparación con su compañera Ana, fue ***D24***, sobre la intervención de la energía cinética de las partículas en la espontaneidad de los procesos químicos y físicos. Las manifestaciones de Ana apuntaban hacia la energía cinética de las partículas cuando afirmaba, en *Fi14*, que "é máis fácil romper os enlaces das moléculas a altas temperaturas". En medio de la puesta en común en gran grupo, entre ambas discutieron si esta facilidad se limitaba al nitrógeno, cuya estructura química se estaba repasando en clase, o era general para todas las sustancias químicas. Para Adela, el triple enlace y el carácter apolar, que dan una idea de la fuerza de la interacción covalente entre los dos átomos de N en la molécula N_2, son los responsables de que se forme el gas que crea la explosión; este gas es estable incluso a altas temperaturas, así que no reacciona y, como gas que es, tiende a ocupar una gran cantidad de volumen y genera la onda expansiva. Pero, a pesar de establecer que la reacción es exotérmica, Adela no reflexionó sobre la influencia de las altas temperaturas en la energía de las partículas (por ejemplo, del gase nitrógeno). Ana, en cambio, recurrió a un modelo energético microscópico para establecer que, a altas temperaturas, los enlaces químicos no son tan fuertes: la cantidad de energía de las partículas es muy alta, y hace que éstas tiendan a vibrar fuera de sus antiguas posiciones de equilibrio y a desplazarse con mayor velocidad por el espacio disponible (lo que hace aumentar el volumen del sistema).

Adela no presentó grandes dificultades en la construcción de las relaciones de la ciencia escolar, salvo en la elaboración de balances entálpicos, que no estableció adecuadamente en la actividad *Fi07*, para los procesos de cambio de estado sólido ⇆ líquido del agua.

Nivel $ER4_{Fi}$ = x_3: subniveles x_{3c}, x_{3b} y x_{3a}

Este nivel está dividido en tres subniveles, entre los cuales se agrupan cuatro esquemas idiosincrásicos.

Subnivel x_{3c}: esquema de Clara

Además de no activar la relación ***D24***, esta alumna no utilizó ninguna relación sobre Cinética Química en sus respuestas a las actividades de

Termodinámica Química. Su esquema ***ER4*** ha experimentado avances desde el final de la fase previa, y en sus manifestaciones escritas se observa una estructuración de ideas que es mucho más acorde con los modelos de redacción de textos de la ciencia escolar y que revela cómo ha ido avanzando Clara en la ordenación y conexión lógica y proposicional de sus razonamientos, tanto si elabora una descripción (véase la respuesta escrita a *Fi12*, a continuación) como si transcribe la interpretación de una ecuación algebraica (respuesta a Fi15).

[Clara, Fi12(1)]: Cando se achega a máis ou menos 837 ºC a rocha vaise desfacendo e transformandose CaO e CO_2 e cando se apaga o forno a rocha comezaría a arrefriar

[Clara, Fi15(1)]: $N_2 + 3\ H_2 \rightarrow 2\ NH_3$ $\Delta G^\circ_f = -16'6$ kJ/mol

O nº de moles de gas é menor nos productos que nos reactivos polo que o desorde diminúe e a entropía diminúe, a variación de entropía é negativa: $\Delta S < 0$.

Ao ser $\Delta H < 0$ e $\Delta S < 0$, a espontaneidade do proceso dependerá da Tª. Como $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, o proceso será espontáneo para valores suficientemente baixos da Tª que fagan que o termo $T\cdot\Delta S$ teña un valor absoluto menor que o termo ΔH, de forma que predomine o termo negativo e a enerxía libre sexa negativa.

Subnivel x_{3b}: esquema de Darío

Con respecto a su compañera en G_D, Clara, Darío no activó las dos relaciones sobre el principio cero, y de sus respuestas escritas no se puede deducir con precisión si reconocía el papel de la variación de energía de Gibbs en la ecuación fundamental de la Termodinámica. Sus manifestaciones escritas en *Fi10* después de la puesta en común son poco clarificadoras:

[Darío, Fi10(x)]: Que através da enerxia libre de Gibs podemos saber se unha reaccion e espontanea ou non, seguindo unha serie de regras establecidas por Gibbs

Tampoco en las actividades de aplicación siguientes sus afirmaciones permiten inferir si utiliza como criterio de espontaneidad $\Delta G < 0$, porque siempre realiza un balance de los valores absolutos de los dos términos de la ecuación fundamental de la Termodinámica, sin hacer explícito qué valor de energía de Gibbs propone para la reacción:

[Darío, Fi11(1)]:$3\ H_2 + \cancel{2}\ N_2 \rightarrow 2\ NH_3$

$\Delta H_R = \Sigma n\cdot H_{Prod} - \Sigma n\cdot H_{REACT}$ $\Delta S = \Sigma n\cdot S_{PROD} - \Sigma n\cdot S_{REACT}$

$\Delta H_R = 2\cdot(-46'2) - 0$ $\Delta S = 305 - (583'3)$

$\Delta H_R = -98'4$ KJ/mol $\Delta S = -148'3$ J/mol·K

$|\Delta H| > |T\cdot\Delta S|$

|98'4| > |298 · 148'3 · 0'001| |98'4| > |34'09| por tanto podemos decir que o proceso é espontáneo

-92'4 = -(298(-197)

ΔH^o = -33'7 KJ

Parece, pues, que para Darío la ecuación fundamental es una "tabla" sobre la que se escriben las "reglas establecidas por Gibbs" para predecir si un determinado proceso es o no espontáneo. Sí interpretaba adecuadamente las variaciones de la entalpía y de la entropía del sistema, pero en cuanto a la de la energía de Gibbs, hemos preferido declarar como valor por defecto la ausencia de activación.

Subnivel x_{3a}: esquemas de Alfonso y Benito

Aunque los esquemas de Alfonso y Benito son iguales en número de relaciones activadas, son diferentes entre sí. En el de Alfonso no se activan las relaciones conceptuales por las que se reconoce que la cantidad de energía por calor de un proceso directo y de su inverso son iguales, y que la cantidad de energía total puesta en juego por calor es la misma si el proceso tiene lugar en un solo paso o en varios (leyes de la Termoquímica); tampoco realizó afirmaciones que permitan considerar activadas las relaciones sobre el primer principio de la Termodinámica. Por lo demás, su esquema ***ER4*** es adecuado, y se observan claras mejorías en la ordenación de sus ideas hacia el final de la fase de intervención:

[Alfonso, Fi14(2)]: Con contacto coa calor, rompense os enlaces, co que os reactivos se expanden de forma violenta e se produce a explosión

[Alfonso, Fi15(x)]: Non tiven en conta calcular a entropía para 2 moles de NH_3 e só o calculei para 1.

Ademais na reacción de NH_3, que é expontánea, tamén é unha racción extremadamente lenta a Tª ambiente, por iso débese someter a grandes temperauras, e a maiores, un catalizador para que a reacción sexa mais rápida e se produza no menor tempo posible

Nivel $ER4_{Fi}$ = x_2: esquema de Brais

El esquema de este alumno es más significativamente más incompleto que el de sus compañeros. No activó relaciones sobre el Equilibrio Químico, ni la idea de modificar la velocidad de las reacciones químicas meciante catálisis, ni los fundamentos teóricos de los principios cero y tercero. En su esquema idionsincrásico, la relación ***D22*** solamente se considera activada una vez, correspondiendo con la estimación teórica de la actividad de indagación *Fi05*. Por el escaso afán de trabajo de este alumno, sus ***ERs*** y ***EAs*** no progresaron al mismo ritmo que los de sus compañeros, y al cabo de un mes, a pesar de que todos habían partido de un nivel de conocimientos que se puede calificar como bastante homogéneo si se tiene en cuenta que se trata de estudiantes que, en origen, procedían de centros educativos distintos y que no todos cursaban las mismas

materias optativas; además, en el grupo había una alumna repetidora y otra con una enfermedad metabólica que dificultaba su aprendizaje. Aunque el propio Brais también padecía una enfermedad neurológica, la suya tenía menos consecuencias negativas en el desarrollo de los conocimientos que la enfermedad de Adela, y sin embargo los resultados de aprendizaje de ella son notablemente mejores que los de él tanto en ***Fp*** como en ***Ci***, y también en ***Fi***.

Nivel $ER4_{Fi} = x_1$: esquema de Carlos

Éste es el $ER4_{Fi}$ más incompleto, como era de esperar para un alumno que faltó a 5 de las 8 sesiones de la unidad didáctica. Se puede considerar que su esquema de razonamiento ***ER4*** era inadecuado en el momento inmediatamente anterior a la caracterización final de la muestra, por lo que se daba por sentado que los resultados de Carlos en ***Cf*** no se acercarían lo suficientemente a las ideas de la ciencia escolar como para pensar que había realizado un aprendizaje fructífero. El profesor, Rodrigo, creía posible que tanto Carlos como Brais obtuvieran mejores resultados en la caracterización final de la muestra, porque ambos trabajaban tan poco en clase que "sabían más de lo que respondían", en palabras de Rodrigo. Quizá en la demanda académica encontraran motivos para, un día después de finalizar la unidad didáctica sobre Termodinámica Química, demostrar la calidad y cantidad real de su aprendizaje en sus respuestas a una serie de pruebas como las actividades con las que llevaban varias semanas trabajando. Aunque el diseño de las pruebas de caracterizacion final les exigiría más esfuerzo cognitivo que una colección de preguntas cerradas o de ejercicios numéricos no significativos, el profesor, Rodrigo, estaba convencido de que la demanda académica podía "funcionar", y, en todo caso, estaba dispuesto a exprimirla todo lo posible.

En el ***Capítulo VI*** se detallan los resultados del aprendizaje que demostraron los alumnos de muestra en sus respuestas a las pruebas de la batería de caracterización final.

Esquema *ER5*: *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento de ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la fase de intervención.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, junto con los subesquemas y sus relaciones, que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento ***ER5*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*. Se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de

cada una. Las relaciones del esquema ***aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos*** están representadas por el símbolo ***M***.

Tabla 13: *frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termodinámica Química*

RELACIÓN	*f*	Cód
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	26	*M01*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	0	*M02*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	6	*M03*
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	5	*M04*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M05*
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M06*
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	7	*M07*
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	7	*M08*
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	15	*M09*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	13	*M10*
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	0	*M11*
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	0	*M12*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M13*
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M14*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	0	*M15*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M16*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M17*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M18*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	13	*M19*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	10	*M20*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	0	*M21*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	15	*M22*
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M23*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	5	*M24*
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	4	*M25*
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	2	*M26*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	4	*M27*
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	4	*M28*
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	9	*M29*

El esquema referencial de razonamiento *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos* se compone de 29 relaciones, y los datos muestran que los estudiantes activaron 16 de ellas, el doble del número de relaciones que utilizaron en sus respuestas a las actividades de la fase previa, pero poco más de la mitad de las que se podían haber construido. La relación de mayor frecuencia ya no se refiere a la cantidad de energía que necesitan las reacciones químicas para comenzar, sino a la definición de las ***interacciones entre partículas*** (que en ***Fp*** había tenido buenos resultados de activación). Las relaciones que definen los procesos de ruptura y formación de enlaces como eventos de cambio en las reacciones químicas (***M24*** y ***M27***) se ven desplazadas a favor de varias relaciones que indican la efectividad de la metodología ensayada para promover la construcción y aplicación de los modelos microscópicos de la Química al estudio de los procesos físicos y químicos, basándose en la noción de ***desorden termodinámico***.

Los esquemas iniciales de ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*** se consideraron suficientes como para abordar el estudio de la Termodinámica Química partiendo de la Termoquímica, aunque

resultan bastante pobres para el nivel educativo de 2º de Bachillerato, tanto en los modelos de partículas como los de enlace y reacción química. En consecuencia, el nivel de elaboración de los modelos de partículas y enlace que se podían activar estaba limitado por los escasos conocimientos iniciales de los alumnos, pero en su intervención Rodrigo aprovechó el sencillo modelo microscópico que se había elaborado en ***Fp*** para cacterizar las transferencias de energía que tienen lugar durante los procesos químicos, vinculando la energía interna del sistema (macroscópica) con la de las partículas (microscópica) y los procesos de ruptura y formación de las interacciones químicas con los intercambios de energía entre el sistema y el entorno. Sobre la base de estas ideas de la ciencia escolar, los alumnos llegaron a activar esquemas de razonamiento en los que la noción de desorden tiene dos contribuciones: el desorden espacial de las partículas, relacionado con la energía cinética de las mismas, que a nivel macroscópico se cuantifica mediante la temperatura del sistema; y el desorden energético, relacionado con el anterior a través de la noción de energía interna (cuya dependencia con respecto a la temperatura ya se había trabajado). Los alumnos activaron relaciones de ***ER5*** mediante las que pusieron de manifiesto que el desorden espacial depende del estado de agregación y de la composición química de las sustancias, y que el desorden energético es distinto en los diferentes estados de agregación de la materia. Así pues, los alumnos analizaron los aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos sobre la base de tres nociones a partir de las que se puede crear una red de relaciones de gran valor interpretativo (justificativo y predictivo). Aunque cada individuo de la muestra desarrolló estas ideas con un nivel idiosincrásico de acercamiento a las ideas de la ciencia escolar, éste es el modelo que se pretendía conseguir:

Los sistemas tienen una ***composición química*** y un ***estado de agregación***, y se encuentran en unas condiciones de ***temperatura*** que vienen dadas por el entorno (en el macroesquema de razonamiento se observan también los vínculos con la presión). Cada composición química se traduce en una estructura tridimensional de las partículas que se caracteriza por la ***disposición espacial*** que adoptan, y se encuentran en movimiento debido a la ***energía (interna)***. Cada partícula individual tiene una cantidad de energía diferente (distribución energética), aunque en general tienden a alcanzar unas cantidades similares (aquí la activación del elemento ***colisiones entre partículas*** aportaría mucha profundidad al razonamiento) que configuran la ***distribución energética*** del sistema. Los perfiles de distribución energética son diferentes para cada sustancia según su ***composición química*** y su *estado de agregación*, por la cantidad de energía de la que pueden disponer las partículas en cada caso.

Recuérdese que al final de la unidad didáctica sobre Termoquímica, los conocimientos iniciales de los estudiantes sobre los modelos de enlace y estructura de la materia eran muy fragmentarios, y apenas fueron más allá de expresar que la

variación de entalpía del sistema es un estimador del cambio de estabilidad química del mismo, y de establecer nexos entre las rupturas y formaciones de enlaces químicos, y la variación de entalpía y de energía interna del sistema.

De las 13 relaciones del esquema referencial no activadas, 7 tienen que ver con los elementos ***colisiones entre partículas***, ***niveles de energía*** y ***microestados de energía***, que a la vista del poco tiempo disponible, no se podrían desarrollar adecuadamente sin tener que sacrificar otras nociones más interesantes desde el punto de vista interpretativo; los alumnos tampoco hicieron explícita la idea de que las interacciones entre partículas se caracterizan por una distancia de enlace, pero la ausencia de esta relación no modifica sustancialmente el esquema. Sin embargo, se esperaba que los estudiantes construyeran mediante las actividades de Termodinámica química cinco nuevas relaciones que no utilizaron, y todas ellas se refieren a la componente energética del desorden termodinámico: que la distribución energética es la que determina la distribución espacial y es diferente para cada composición química, y que el desorden termodinámico se caracteriza por la distribución energética (promedio) de las partículas. Los alumnos prefirieron, en general, relacionar directamente el desorden termodinámico del sistema con la composición química, y no hicieron explícita la relación entre el desorden termodinámico y el cero absoluto de temperatura, aunque esta relación no se pidió explícitamente en las actividades. De las respuestas que elaboraron a las actividades, se infiere que la relación que establecieron entre desorden y temperatura es extrapolable al cero Kelvin, pero se prefirió no ayudar a los estudiantes a hacer explícita esta idea, y comprobar en las actividades de caracterización si eran capaces de utilizarla de manera autónoma.

De las 29 relaciones del esquema referencial ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos***, 18 eran ya conocidas, por los cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación f y sus correspondientes promedios de activación para estas relaciones conocidas y las 11 relaciones nuevas, se obtienen unos promedios bajos, aunque en ambos casos superiores a los que se observaron en la fase previa: $f_{(no\ nuevas)} = 90$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 5$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 7$; y $f_{(nuevas)} = 55$, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = 6$, y $\sigma_{(nuevas)} = 6$. Los datos estadísticos indican que los alumnos tendieron a utilizar más las relaciones conocidas que las nuevas para construir sus descripciones e interpretaciones. Sin embargo, las desviaciones típicas arrojan un buen resultado, porque $\sigma_{(no\ nuevas)}$ apenas crece y $\sigma_{(nuevas)}$ disminuye, en parte por la activación de más relaciones que las que se habían utilizado a lo largo de *Termoquímica.*

La tabla siguiente recoge información sobre la activación de las relaciones de *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*, para cada una de las 15 actividades implementadas de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Tabla 14: activación de las relaciones del esquema de razonamiento aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5) en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Fi01	0	6	0	(0,0)
Fi02	*6*	*6*	*1*	*(1,1)*
Fi03	*6*	*6*	*1*	*(1,1)*
Fi04	6	7	1	(0,1)
Fi05	*28*	*7*	*4*	*(4,4)*
Fi06	25	8	5	(0,5)
Fi07	21	8	5	(0,5)
Fi08	*0*	*6*	*0*	*(0,0)*
Fi09	*0*	*6*	*0*	*(0,0)*
Fi10	12	6	3	(0,3)
Fi11	0	6	0	(0,0)
Fi12	2	6	2	(0,2)
Fi13	1	8	1	(0,1)
Fi14	37	8	9	(0,8)
Fi15	1	7	1	(0,1)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, con un número de asistentes que varió entre $A = 6$ y $A = 8$.

Todas las frecuencias de activación son muy bajas, salvo para *Fi14*, en la que se pretendía que los alumnos aplicaran sus conocimientos para interpretar una reacción explosiva. En general, las actividades de indagación apenas contienen relaciones sobre el dominio microscópico; de hecho *Fi08* y *Fi09* no contienen una sola relación microscópica. Los objetivos que se perseguían con la no explicitación de los modelos químicos en las actividades de indagación son los siguientes:

En primer lugar, el tema de la unidad didáctica ensayada es la Termodinámica Química, cuyas bases están en la Termodinámica Clásica. En el último siglo, los conocimientos macroscópicos se han ido complementando con modelos de tipo microscópico y estocástico, pero nos parecía interesante que los alumnos fueran conscientes de que la Termodinámica es sobre todo macroscópica, y que los modelos de partículas, enlace y reacción química no se inscriben en ella, sino que se han vinculado a su marco teórico para construir un *corpus* de conocimiento más interpretativo. Además, en la literatura se han detectado numerosas ideas alternativas y dificultades de aprendizaje que tienen que ver con el desarrollo de relaciones conceptuales encuadradas en el dominio microscópico, y para presentar los modelos químicos consideramos más ventajoso no incluirlos en el texto de las actividades, sino que el sea el profesor quien introduzca las ideas de la ciencia escolar, de manera que los alumnos no se limiten a leer una información nueva

contenida en unos pocos párrafos, y tengan que añadir a sus guiones de trabajo las nuevas ideas, una vez se hayan trabajado mediante una puesta en común.

Aunque los valores de los parámetros de activación sean muy bajos, los indicadores *f* y *R* de las actividades de aplicación permiten concluir que la interacción con la metodología promovió la explicitación de parte de las relaciones microscópicas que se pretendían trabajar. Toda actividad de aplicación situada después de una actividad de indagación tiene un número igual o mayor de relaciones activadas (*R*), y las frecuencias de activación son comparables entre unas y otras. Incluso después de *Fi05*, la actividad de indagación que más relaciones nuevas de los modelos químicos introduce, se encuentran dos actividades de aplicación en las que la frecuencia cae poco a poco, para reaparecer con fuerza en *Fp14*, en la elaboración de una justificación microscópica a las reacciones de los materiales explosivos. En ***ER5***, a diferencia de lo que se observa en los demás esquemas de razonamiento, todas las actividades presentan un valor *min* = 0 de las duplas *(min,máx)*, lo que indica que siempre hubo al menos un alumno que no activó el esquema para dar respuesta a las actividades. Esta misma tendencia se había producido también en la fase previa.

La actividad de mayor éxito en la activación de relaciones de *ER5* fue, como se esperaba, *Fi14*. Con menor frecuencia le siguen *Fi05* (de indagación), y *Fi06* y *Fi07*, de aplicación, que proponen reacciones químicas cuya interpretación microscópica se construyó sobre la base de la noción de desorden. En las demás actividades, las bajas frecuencias de activación muestran que los alumnos.

Los valores de las duplas *(min,máx)* señalan una dispersión de los datos que es la máxima posible, ya que *min* = 0 en toda actividad que no sea de indagación; pero la pequeña cantidad de datos no permite extraer conclusiones fiables.

Para analizar la profundidad interpretativa que alcanzaron los alumnos en la construcción de modelos microscópicos de representación del conocimiento, hay que rescatar todas las relaciones microscópicas activadas durante la fase de intervención, también las contenidas en ***ER1***, ***ER2***, ***ER3*** y ***ER4***. La tabla siguiente ofrece un resumen de los principales datos de activación de las relaciones microscópicas, incluyendo en la última columna los correspondientes al conjunto del macroesquema de razonamiento ***ERT*** (***Termoquímica y Termodinámica Química***).

Tabla 15: resumen de los principales datos de activación de las relaciones microscópicas de los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3 y ER4 y ER5, junto con el macroesquema ERT, en el desarrollo de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*ER1*	*ER2*	*ER3*	*ER4*	*ER5*	*ERT*
$\mathbf{f_{(micro)}}$	643	41	16	25	145	870

$\bar{x}_{(micro)}$	38	8	4	4	5	14
$\sigma_{(micro)}$	24	18	1	3	6	20

De las interpretaciones realizadas en los apartados anteriores y de los datos contenidos en la tabla, se extraen las siguientes conclusiones sobre la activación de relaciones microscópicas durante la fase de intervención:

Al comparar las frecuencias de activación *f* correspondientes a los distintos ***ER***s, la de ***ER1*** sobresale significativamente sobre los demás, aunque no es el esquema con mayor número de relaciones microscópicas. La *f* asociada a *ER4* ya no es nula (en *Termoquímica* sí lo era), y las de *ER5* sobrepasan a las de *ER2*, *ER3* y *ER4*; el porcentaje de las relaciones activadas con respecto al total de relaciones microscópicas muestra que los alumnos llegaron a realizar una interpretación dinámica de las características microscópicas del proceso, aunque otra vez prefirieron basarse en los modelos de partículas y enlace, y no tanto en la dinámica microscópica de la reacción química. Recuérdese también que en las pruebas de la batería de caracterización inicial de la muestra (***Capítulo IV***), los resultados fueron completamente nulos para ***ER3***, ***ER4*** y ***ER5***, y bastante bajos para ***ER2***.

Ahora hay valores elevados de la desviación típica en *ER1*, más que en *ER2* y *ER4* (aunque en *ER2* la desviación típica sigue superando la media aritmética). Así pues, los combinaron las relaciones microscópicas de ***ER1*** y ***ER5*** para crear un modelo de partículas que se abre al modelo de reacción química (hacia ***ER3*** y ***ER4***) y en mayor medida al de enlace químico, lo que es un buen indicador del éxito de la segunda unidad didáctica ensayada: partiendo de la baja activación de las relaciones microscópicas que se obtuvo en ***Fp***, a lo largo de la fase de intervención se logró que los alumnos incorporaran a sus ***ER***s nuevos elementos y relaciones que les permitieron alcanzar una mayor profundidad interpretativa en sus razonamientos.

Las dieciséis relaciones de ***ER5*** que se activaron sugieren que los esquemas de los alumnos experimentaron un proceso de crecimiento que les permitió desarrollar un modelo energético microscópico más maduro, basado en la existencia de enlaces químicos entre unas ***partículas*** que tienen *energía*:

En ***Fp***, los estudiantes habían hecho explícito que las diferentes ***interacciones entre partículas*** tienen distinta *fuerza de enlace*, y la ***ruptura de las interacciones*** requiere un aporte de energía. Durante las reacciones químicas se forman nuevos enlaces, lo que a su vez requiere energía. Pero con las actividades de la segunda secuencia didáctica llegaron a describir los cambios que se producen en la ***estabilidad*** del sistema como consecuencia de las rupturas y formaciones de enlaces. En ***Fp***, la única idea sobre la estructura microscópica de la materia que parecía tener un significado para ellos, es que en los distintos ***estados de agregación*** las partículas tienen una ***distribución espacial*** diferente, y se detectaron ideas alternativas a este respecto. Durante la fase de intervención, la distribución espacial se relacionó también con la ***composición química***, y se activó el elemento

distribución energética para indicar el intervalo de cantidades de energía que tienen las partículas, dependiendo del ***estado de agregación*** del sistema. Se hizo explícito que las partículas se encuentran en ***desorden***, entendiéndose éste como la dispersión de las partículas por el espacio y la capacidad de movimiento que tienen. El ***desorden termodinámico*** se relacionó directamente con la ***temperatura absoluta*** del sistema, aunque el concepto de cero absoluto no se llegó a utilizar. El elemento ***colisiones entre partículas***, que permite relacionar los modelos de partículas, enlace y reacción química de una manera más directa, no se activó.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de razonamiento de los alumnos, que aparecen recogidos en la tabla siguiente. Los esquemas ***ER5*** de los alumnos se han categorizado en tres niveles x de ordenación, de x_1 a x_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar), con dos subniveles para los niveles x_1 y x_2, y tres para x_3.

Tabla 16: r*elaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER5,* ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	x_3			x_2			x_1		-		
	x_{3c}	x_{3b}	x_{3a}	x_{2b}		x_{2a}	x_{2a}	x_{1a}			
ALUMNOS	**Alfonso**	**Clara**	**Ana**	**Adela**	**Darío**	**Benito**	**Carlos**	**Brais**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✖	✖	✓	✓	✓			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	✖	✓	✓	✓	✖	✓	·	·			
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	✓	✓	·	✓	✓	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓			
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓			
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la	·	·	·	·	·	·	·	·			

DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA											
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	·	·	✓	·	·			
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	✓	·	✓	✓	·	✓	·	·			
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	·	·	✓	·	·	✓	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	✓	✓	·	✓	✓	·	·	·			
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	✓	✓	·	✓	✓	·	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

A continuación se describen los esquemas ***ER5*** prototípicos de cada nivel de ordenación, y se comentan las características que explican su categorización en los niveles $ER5_{Fi} = [x_1,...,x_3]$.

Nivel $ER5_{Fi} = x_3$: subniveles x_{3c}, x_{3b} y x_{3a}

En el nivel más cercano a las ideas de la ciencia escolar se agrupan los esquemas tres alumnos, cada uno situado en un subnivel diferente:

Subnivel $ER5_{Fi} = x_{3c}$: esquema ***ER5*** de Alfonso

Este alumno activó 15 de las 16 relaciones que se han comentado ya; la única que no llegó a utilizar fue la que establece que la ruptura de interacciones se traduce en una pérdida de estabilidad para el sistema (idea que Ana y Benito sí utilizaron). Solamente manifestó problemas a la hora de definir en qué consiste la fuerza de enlace:

[Alfonso, Fi12(x)] (…) á menor temperatura, os enlaces rompen mais fácil (…)

Dos actividades después, demostró haber construido la relación de la ciencia escolar cuando escribió que el contacto con el "calor" (posiblemente una entidad pseudo-material asociada a las altas temperaturas) es el responsable de romper unos enlaces que no se rompían a temperaturas menores:

[Alfonso, Fi14(2)] Con contacto coa calor, rompense os enlaces, co que os reactivos se expanden de forma violenta e se produce a explosión

Subnivel $ER5_{Fi} = x_{3b}$: esquema ***ER5*** de Clara

El esquema de esta alumna es muy parecido al de Alfonso, aunque ella no tuvo dudas para interpretar la fuerza de enlace: "un triple enlace que é moi difícil de romper e xera moita enerxía [ao formarse]", dice en *Fi14(2)*. Esta alumna, sin

embargo, no activó la relación ***M25***, en la que se establece que la ruptura de enlaces requiere que se aporte energía.

Subnivel $ER5_{Fi} = x_{3a}$: esquema ***ER5*** de Ana

Ana no hizo explícita la idea de que la fuerza de enlace aporta estabilidad, y que la formación de enlaces hace el sistema más estable; aunque sí manifestó que la ruptura de interacciones hace a los sistemas más intestables. Dada la poca coherencia interna que tienen algunos esquemas microscópicos de los alumnos, se ha optado por no activar la relación ***M04*** en el esquema de esta alumna, aunque tal vez esté implícita en él.

Nivel $ER5_{Fi} = x_3$: subniveles x_{3c}, x_{3b} y x_{3a}

En este subnivel, se organizan los esquemas de cuatro alumnos.

Subnivel $ER5_{Fi} = x_{2c}$: esquemas ***ER5*** de Adela y Darío

Estos alumnos presentaron alguna dificultad de aprendizaje significativa a lo largo de la secuencia didáctica. En el caso de Adela, ya se ha comentado que tomó por *iónicas* las moléculas covalentes de los hidrógeno y nitrógeno, ionizó positivamente el hidrógeno y negativamente el nitrógeno, y representó la reacción de formación del amoníaco mediante un ciclo de Born-Haber.

En el caso de Darío, no reconoció las interacciones débiles que se establecen entre las partículas que forman una sustancia química, de tal manera que las mantienen más o menos ligadas a otras mediante fuerzas electrostáticas:

[Darío, Fi07(1)] Os solidos, son mais ordeados que os liquidos, porque non se rompen as suas estructuras de forma natural.

En actividades posteriores, sus manifestaciones sobre las interacciones entre partículas y la fuerza de enlace se acercan a las de la ciencia escolar, a medida que se construían nuevas relaciones que permitían elaborar razonamientos más interpretativos. Los esquemas de estos alumnos se pueden considerar adecuados si se analizan dentro del contexto de esta investigación, valorando el tiempo del que se dispuso y de los conocimientos de los que se partía; pero no son suficientes para el nivel de 2º de Bachillerato.

Darío, como Ana, focalizó sus interpretaciones de los aspectos energéticos microscópicos de las reacciones químicas en el concepto de la formación de enlaces, dejando de lado la ruptura de interacciones entre las partículas.

Subnivel $ER5_{Fi} = x_{2b}$: esquema ***ER5*** de Benito

Benito había destacado como uno de los alumnos más activos en la utilización de los modelos microscópicos durante la fase previa; pero sus esquemas, aun siendo de los mejores de la muestra, eran incompletos y fragmentarios. A lo

largo de la fase de intervención amplió su ***ER5***, aunque no apeló a la formación de interacciones como consecuencia de los procesos químicos ni a la fuerza de enlace como responsable de la estabilidad de las sustancias químicas. Se le ha asignado por defecto el valor de relación no activada para ***M07*** y ***M08***, porque Benito faltó a clase el día que se desarrollaron los aspectos estadísticos relacionados con la estructura microscópica de la materia.

Nivel $ER5_{Fi} = x_1$: subniveles x_{1b} y x_{1a}

Este subnivel contiene los dos esquemas más alejados de las ideas de la ciencia escolar: se trata de los ***ER5*** de Carlos y Brais. En este caso, en el subnivel x_{1b} está el esquema de Carlos, que tiene una relación más que el de Brais (subnivel x_{1a}). Ambos alumnos tienen claro que la materia está formada por partículas, y que se puede adjudicar a los sistemas una propiedad llamada desorden, que depende de la temperatura absoluta y se relaciona con la variación de la entropía de los sistemas. La poca concreción y detalle de sus respuestas no permite determinar si estos alumnos reconocieron el desorden termodinámico como el patrón de distribución energética de las partículas del sistema, así que se ha considerado no activada la relación ***M09***. En sus esquemas aparecen las asignaciones por defecto para las relaciones ***M07*** y ***M08***, que se desarrollaron en la actividad de indagación *Fi05*.

El ***ER5*** de Carlos contiene una relación que no figura en el esquema de Brais: Carlos considera que los procesos necesitan una energía que los inicie, y por este motivo considera que el móvil perpetuo de segunda especie que se propone en *Fi04* no es posible: "Que non se pode realizar, eu penso que se lle tería que aplicar algún tipo de enerxía".

V.3.1.2. Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción *EA1*, …, *EA4*

Los cuatro apartados que vienen a continuación están dedicados a la descripción de los esquemas de acción ***EA1***, ***EA2***, ***EA3*** y ***EA4*** que activaron los alumnos de la muestra a lo largo de la fase de intervención.

Esquema *EA1*: *Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones de los esquemas de acción ***EA1*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas durante la fase de intervención. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación

(número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***EA1***, representadas por el símbolo ***I***.

Tabla 17: *frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1), extraídas de las actividades de Termodinámica Química*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	93	*I01*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	95	*I02*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	95	*I03*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	93	*I04*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	92	*I05*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	86	*I06*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	60	*I07*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	30	*I08*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	62	*I09*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	46	*I10*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	46	*I11*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	52	*I12*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	23	*I13*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	92	*I14*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	33	*I15*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	30	*I16*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	27	*I17*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	65	*I18*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	67	*I19*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	59	*I20*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	28	*I21*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	79	*I22*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	75	*I23*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	75	*I24*
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	69	*I25*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	11	*I26*
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	11	*I27*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	64	*I28*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	44	*I29*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	24	*I30*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	84	*I31*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y	25	*I32*

DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS		
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	25	*I33*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	28	*I34*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	28	*I35*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	32	*I36*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	20	*I37*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	32	*I38*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	26	*I39*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	91	*I40*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	59	*I41*

El esquema referencial de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** se compone de 41 relaciones, y los datos muestran que los estudiantes las activaron todas durante la fase de intervención. Como en ***Fp***, las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la identificación de los ***procesos termodinámicos*** que tienen lugar en los ***sistemas termodinámicos*** propuestos, y que la ***identificación y la descripción de los aspectos termodinámicos*** se realiza mediante el reconocimiento, el control y la exclusión de las magnitudes termodinámicas, para las cuales realizan un ***establecimiento de significados***. Además, en ***Fi*** se activa con mucha frecuencia la relación *I31*, lo que indica que en la segunda unidad didáctica los estudiantes dieron más importancia a la ***interpretación de aspectos termodinámicos***.

Nuevamente, la utilización de las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales para caracterizar los procesos fue aceptable. En conjunto, las *f* de las relaciones sobre el control y la exclusión de las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales son mayores que las *f* de las variaciones de las magnitudes termodinámicas básicas (temperatura, presión, volumen), con las que los alumnos ya llevaban trabajando varios cursos, Al tomarlas por separado, solamente ΔG tiene una frecuencia ligeramente inferior a ΔT, por ejemplo, pero este resultado es esperable: la temperatura influye tanto en la variación de energía de Gibbs, como en las demás magnitudes termodinámicas del sistema.

Las interpretaciones relacionadas con los principios que rigen el comportamiento de los sistemas termodinámicos se basan en los conceptos de *calor*, *trabajo* y *variación de entropía*. Como sucedió en ***Fp***, los alumnos utilizaron más veces la noción de calor como un proceso de transferencia energética, relacionado con la variación de temperatura, mientras que el trabajo tenía una aceptación menor; pero consideran más importante analizar los los procesos de transferencia por trabajo cuando se trata de reflexionar sobre los principios que se verifican en las transferencias de energía entre el sistema y el entorno. Así pues, las actividades de *Termodinámica Química* sirvieron para que los estudiantes dieran más utilidad al *trabajo* como una transferencia energética que ha de tenerse en cuenta cuando se analizan los procesos a presión constante.

Con respecto a ***Fp***, las frecuencias de activación tienden a disminuir, pero la interacción con la segunda unidad didáctica ensayada produjo la utilización de todas las relaciones del referencial ***EA1***.

Al comparar las frecuencias f y los promedios de activación para las 24 relaciones ya conocidas de cursos anteriores y las 17 nuevas, se obtienen los siguientes datos: $f_{(no\ nuevas)}$ **= 1492**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 62** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 30**; y $f_{(nuevas)}$ **= 684**, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 40** y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 16**. Todos los datos tienen parámetros estadísticos de menor valor en ***Fi*** que en ***Fp***, en parte debido a la muerte muestral producida (3 alumnos menos) y por la creciente inasistencia de Carlos y la negativa de Brais a responder buena parte de las cuestiones. Al calcular las frecuencias por alumno y actividad y comparar los datos de las relaciones que ya se habían activado en ***Fp***, con las frecuencias que alcanzan en ***Fi***, se observa que ***I23***, ***I24*** e ***I25*** e ***I37*** se utilizaron más en las actividades de *Termodinámica Química* que en en las de *Termoquímica*; para las demás relaciones, los resultados son más favorables a ***Fp***. De aquí se concluye que, en la segunda propuesta ensayada, los alumnos tendieron a dejar de lado las relaciones trabajadas en ***Fp***, y se produjo un crecimiento de los esquemas de acción ***EA1*** con la activación de nuevos elementos y nuevas relaciones entre magnitudes termodinámicas cuyas variaciones dan cuenta de la espontaneidad de los procesos naturales.

Ahora que se activan todas las relaciones del referencial ***ER1***, la comparación de las desviaciones típicas $\sigma_{(no\ nuevas)}$ y $\sigma_{(nuevas)}$ ya no está sesgada por la existencia de relaciones de f = 0, y por lo tanto ayuda a interpretar con mayor precisión hasta qué punto los estudiantes aceptaron las relaciones nuevas de la ciencia escolar. El hecho de que $\sigma_{(nuevas)} > \sigma_{(no\ nuevas)}$, da una idea de la efectividad de la segunda propuesta didáctica en la realización de acciones que involucran la utilización de las magnitudes termodinámicas principales y los enunciados de los principios de la Termodinámica y de las leyes de la Termoquímica para identificar, describir e interpretar los procesos termodinámicos.

En la tabla siguiente se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades implementadas de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Tabla 18: a*ctivación de las relaciones del esquema de acción* ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** *(**EA1**) en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Fi01	60	6	22	(0,22)
Fi02	*96*	*6*	*16*	*(16,16)*

Fi03	*150*	*6*	*25*	*(25,25)*
Fi04	169	7	25	(4,25)
Fi05	*231*	*7*	*33*	*(33,33)*
Fi06	84	8	14	(0,14)
Fi07	125	8	23	(0,23)
Fi08	*174*	*6*	*29*	*(29,29)*
Fi09	*162*	*6*	*27*	*(27,27)*
Fi10	125	6	26	(16,25)
Fi11	162	6	27	(12,27)
Fi12	105	6	18	(16,18)
Fi13	156	8	26	(0,26)
Fi14	217	8	35	(13,35)
Fi15	160	7	28	(2,28)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, con un número de asistentes que varió entre $A = 6$ y $A = 8$. Fueron cuatro las actividades de la secuencia en las que al menos uno de los alumnos no utilizó ninguna relación de sus esquemas de razonamiento y acción: Benito en *Fi01*, Brais e Carlos en *Fi06* y *Fi07*, y otra vez Carlos en *Fi13*. En las 11 actividades restantes, todos los que realizaron las tareas activaron relaciones de ***EA1***.

Los datos correspondientes a las actividades de indagación/reestructuración *Fi02*, *Fi03*, *Fi05*, *Fi08* y *Fi09* se resaltan en bastardilla y se les asigna como número de relaciones utilizadas por el alumnado, el número de las que se trabajan en el texto de la actividad, como ya se ha explicado ya.

Se comparan los valores de *f*, *R* y *(min,máx)* adjudicados a las actividades de indagación/reestructuración y los valores obtenidos en las actividades de exploración y de aplicación correspondientes. Todas las de aplicación mejoran la activación de relaciones de *EA1*, exceptuando *Fi06*, que está demasiado centrada en el estudio del desorden termodinámico y la entropía, y tiene situada inmediatamente antes una actividad de indagación en la que se tratan conceptos y modelos muy complejos. En general, todos los alumnos que realizaron una actividad de indagación activaron la mayoría de las relaciones de ***EA1*** que se trataban. En cuanto a las duplas *(min,máx)*, las estimaciones para las actividades de indagación no son diferentes de los valores máximos de las actividades de aplicación siguientes, aunque en los mínimos sí hay diferencia en prácticamente toda la unidad didáctica. De estos datos se deduce que no todos los alumnos lograron una buena activación de las relaciones del esquema ***EA1*** en las actividades de indagación.

Según los indicadores *f* y *R*, las actividades que condujeron a una mayor utilización de ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** son *Fi05* (indagación) y *Fi14* (aplicación), seguidas de *Fi04* (aplicación) y *Fi08* (indagación). La dispersión de los datos es casi nula en *Fi12*, y

baja en *Fi10*, como sucedió en general con los esquemas de razonamiento. En todas las actividades salvo *Fi10*, el valor de *R* coincide exactamente con el máximo de la dupla *(min,máx)*, así que todas las actividades de *Termodinámica Química* ayudaron a algunos alumnos a alcanzar una buena eficacia en la identificación y descripción de los aspectos relevantes de los procesos termodinámicos. Sin embargo, a diferencia de lo que sucedía en ***Fp***, no se observa que en las últimas actividades se produzca un descenso en la dispersión *(min,máx)* que indique una consolidación generalizada de las relaciones activadas.

Las actividades que menos relaciones ayudaron a activar fueron las dos primeras y *Fi06*, que tienen frecuencias bajas; pero el valor *R* señala que el número total de relaciones activadas es poco inferior al de otras actividades. La explicación de la baja utilización de relaciones está en que se trata de actividades que generaron respuestas breves y por parte de pocos alumnos, debido a los problemas actitudinales ya comentados. Éstos son los responsables de que la dispersión en la activación sea tan elevada salvo en las actividades que más llamaron la atención de los estudiantes: la triada de cuestiones sobre la piedra caliza (*Fi10*, *Fi11* y *Fi12*), y *Fi14*, que trata los aspectos termodinámicos de las explosiones. La dicotomización de la muestra es clara: Carlos y Brais generaron respuestas de menor cantidad y calidad que sus compañeros, y realizaron una construcción pobre de las relaciones de la ciencia escolar. Los problemas de aprendizaje no parecen estar tanto en problemas conceptuales o procedimentales, sino en los axiológicos, y los resultados de ***EA1*** de estos alumnos lo confirman: el desarrollo de destrezas y estrategias exige un trabajo intelectual intenso que ellos no hicieron por indolencia.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA1***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente, con la clave de símbolos habitual.

Los niveles *f* de ordenación de los ***EA1*** idiosincrásicos son solamente dos, x_1 y x_2 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar), y no se han establecido subdivisiones.

Tabla 19: r*elaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA1, Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	x_2							x_1	-		
ALUMNOS	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Clara**	**Darío**	**Adela**	**Carlos**	**Berta**	**Diana**	**Débora**

ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS											
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

A continuación se describen los esquemas ***EA1*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $\boldsymbol{EA1}_{Fi} = [x_1, x_2]$.

Nivel $\boldsymbol{EA1}_{Fi} = x_2$: esquemas de Ana, Alfonso, Brais, Benito, Clara, Darío y Adela

La muestra fue muy homogénea en la activación de esquemas ***EA1***, de ahí que sólo haya dos niveles de ordenación de los esquemas idiosincrásicos. El nivel x_1 es totalmente coincidente con el referencial, es decir, los esquemas de estos siete alumnos contienen todas las relaciones de la ciencia escolar. La única puntualización que caba hacer está en las dificultades que tuvieron que superar Darío y Adela para llegar a completar su esquema:

En *Fi15*, Darío dudaba de sus cálculos de ΔS y copió el resultado de Ana, que no se correspondía con el suyo porque ambos tomaban como referencia un número de mol distinto. Además, confuso porque no detectaba dónde estaba el error de cálculo, nombró este valor como ΔH en lugar de variación de entropía.

En cuanto a Adela, al principio de la unidad didáctica tuvo problemas para predecir si la evaporación del agua es un proceso exotérmico o endotérmico; ella consideraba que se trata de un cambio de estado en el que se desprende energía, probablemente porque creyera que el agua libera al entorno un exceso de energía interna emitiendo vapor de agua y haciendo aumentar la temperatura del entorno. En la actividad *Fi07* volvió a exteriorizar estas dificultades, al considerar que en la solidificación del agua se absorbe energía. Ya se ha comentado que, en general, los estudiantes no eran capaces de identificar en qué sentido se producen las transferencias energéticas de los cambios de estado del agua, y que el profesor tuvo que intervenir para explicarlas.

Como en Fp, se observa un gran contraste entre la homogeneidad de los esquemas de acción ***ER1*** idiosincrásicos y los ***ER2***, cuya ordenación incluye cinco

niveles *f*. De estos resultados se infiere que los alumnos de la muestra no tuvieron grandes dificultades para desarrollar las destrezas que permiten reconocer los sistemas objeto de estudio en Química y darse cuenta de que los procesos consisten en evoluciones posibles de los mismos, que se estudian mediante la identificación, cuantificación y control de los cambios sucedidos. Pero se constata una falta significativa de conocimiento conceptual sobre la estructura de los sistemas materiales y las propiedades de los mismos que permiten definir su estado, detectar cambios en él e indagar en las características distintivas de los procesos. Los alumnos que mejores conocimientos conceptuales desarrollaron a lo largo de la fase de intervención (niveles *f* altos de ***ER2***), son también los que más repetidamente demostraron sus destrezas en la identificación y descripción de los sistemas y procesos termodinámicos, y se observan diferencias personales, aunque en ***Fi*** no ayudan a perfilar tanto los estilos de aprendizaje de cada individuo:

Ana, Benito, Darío y Brais realizaron un aprendizaje fructífero en cuanto a la identificación y descripción de los sistemas y procesos, tanto en lo conceptual como en lo procedimental (esquemas ***ER2*** y ***EA1*** bastante completos). Clara, Adela y Alfonso demostraron todas las destrezas y estrategias objeto de aprendizaje, aunque sus acciones se desarrollaron sobre algunas relaciones conceptuales menos que las de sus compañeros. Queda por comentar Carlos, cuyos esquemas de razonamiento y de acción no se acercan a la ciencia escolar en un nivel tan alto.

Nivel $EA1_{Fi} = x_1$: esquema de Carlos

Ya se ha comentado que las ideas iniciales de este alumno eran poco conexas, y que a lo largo de la unidad didáctica *Termoquímica* había manifestado dificultades para diferenciar la entalpía de la variación de entalpía, y poca iniciativa para clarificar sus dudas. A medida que avanzaba la intervención, la falta de trabajo personal hizo que no consolidara adecuadamente los conceptos, modelos y procedimentos de la ciencia escolar, y que por ello no llegara a activar las relaciones sobre la identificación y control de la energía de Gibbs y su variación, que se estudian en la segunda mitad de la secuencia didáctica. Carlos tampoco hizo explícito que la relación entre presión y volumen es inversa, y no estableció el significado de las leyes de la Termoquímica.

Esquema *EA2*: *Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge los elementos y relaciones de los esquemas de acción ***EA2*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas durante la fase de

intervención de la investigación. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***EA2***, representadas por el símbolo ***R***.

Tabla 20: *frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (ER3), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termodinámica Química*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	91	*R01*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	91	*R02*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	80	*R03*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	84	*R04*
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	82	*R05*
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	91	*R06*
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	91	*R07*
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	76	*R08*
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	63	*R09*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	56	*R10*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	42	*R11*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	42	*R12*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	0	*R13*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	31	*R14*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	19	*R15*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	13	*R16*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	13	*R17*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	38	*R18*
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	38	*R19*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	27	*R20*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	42	*R21*
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	27	*R22*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	13	*R23*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	36	*R24*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	13	*R25*
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	7	*R26*
CALOR se mide en JULIO/MOL	13	*R27*
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	7	*R28*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	7	*R29*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	23	*R30*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	21	*R31*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	13	*R32*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	9	*R33*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	2	*R34*
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	7	*R35*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	7	*R36*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	83	*R37*
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	89	*R38*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	89	*R39*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	87	*R40*

El esquema referencial de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** se compone de 40 relaciones, y los datos muestran que los estudiantes activaron 39, seis más que en la fase previa. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la ***representación de los aspectos termodinámicos*** mediante las ***representaciones algebraicas*** y el ***léxico científico***. Se hizo explícita la necesidad de atenerse a ***convenios*** para alcanzar una ***consistencia en la simbología*** utilizada, tanto para el ***léxico científico*** (que ya se había manifestado en ***Fp***), como para las ***representaciones algebraicas***. Los alumnos iban tomando conciencia de que el lenguaje científico se caracteriza por la *eliminación de la polisemia cotidiana* y una gran *precisión en el lenguaje*, y se observan avances en la expresión escrita de las ideas, aunque todavía se presentaron dificultades para adoptar la terminología científica. Debe tenerse en cuenta que, al principio de la fase experimental de la investigación, los estudiantes redactaban textos bastante toscos en cuanto al vocabulario empleado y la calidad de la expresión; descuidaban incluso aspectos básicos del lenguaje, como la puntuación y la ortografía, que resultan muy deficientes para el nivel de 2º de Bachillerato.

La única relación del ***EA2*** referencial que no se activó es la que establece que la escala de la energía de Gibbs es relativa. Se puede considerar que la ausencia de esta relación no resta mucho poder interpretativo a lo esquemas, en el sentido de que la construcción de las demás escalas de unidades sí se puso de manifiesto, los alumnos utilizaron las unidades adecuadas a la mayoría de las magnitudes con las que trabajaron; la única variable termodinámica cuyas unidades de medida originaron dudas es la entropía, a la que en ocasiones atribuyeron el kJ/mol, por analogía con la entalpía y la energía de Gibbs. Para el profesor colaborador de la investigación, Rodrigo, el nivel de expresión matemática que alcanzaron los alumnos fue bueno, porque "al menos" hicieron el esfuerzo de emitir los resultados acompañados de las unidades de medida, y aunque se repitieron los problemas con los signos de las cantidades numéricas, se observó que los estudiantes ponían intención en realizar los cálculos de manera más cuidadosa que al principio de la intervención. De todas maneras, las destrezas relacionadas con la realización de operaciones básicas (suma, resta, producto, cociente) tardaban en adquirirse, y durante el desarrollo de la unidad didáctica Rodrigo se enfrentó a un dilema:

Si se le dedicaba demasiado tiempo a los cálculos, los alumnos podrían asimilar que "eso era lo único importante", así que se corría el riesgo de que abandonaran la comprensión conceptual para centrarse en trabajar con números sin signficado. Pero, si no se prestaba atención a la representación matemática de las magnitudes termodinámicas, tampoco se podía obtener resultados de los que extraer conclusiones y a partir de los cuales tomar decisiones fundamentadas en ideas científicas; además, las PAAU se acercaban, y en este tipo de pruebas prima la realización de ejercicios numéricos. Así pues, hubo que alcanzar un equilibrio entre

el desarrollo de la comprensión conceptual y la manipulación de cantidades numéricas mediante las operaciones algebraicas básicas.

De las 40 relaciones del referencial ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, 27 eran ya conocidas por haberlas trabajado cursos pasados. Las frecuencias de activación *f* y los correspondientes promedios para estas relaciones y las 13 nuevas son: $f_{(no\ nuevas)}$ **= 1364**, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)}$ **= 51** y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)}$ **= 35**; frente a ellas, $f_{(nuevas)}$ **= 299**, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)}$ **= 23** y $\sigma_{(nuevas)}$ **= 19**. Estos datos estadísticos revelan que los estudiantes demostraron más las nuevas destrezas y estrategias en la fase de intervención que en la fase previa (así lo demuestran el aumento de la frecuencia y el promedio de activación de las relaciones nuevas), y la dispersión de los datos disminuyó. Las primeras actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química* tienen un perfil más descriptivo, de manera que los alumnos no necesitaban expresar un gran número de ideas de manera matemática. Sin embargo, utilizaron los criterios de signos para interpretar el sentido de las transferencias energéticas y los cambios en el desorden termodinámico, y demostraron que habían llegado a distinguir entre las variables y sus variaciones. Cuando se hicieron las actividades en las que se pide explícitamente la realización de cálculos para interpretar los cambios que tienen lugar como consecuencia de los procesos termodinámicos, los estudiantes se adaptaron rápidamente a procesar las cantidades de magnitud requeridas, e interpretaron los significados de los valores numéricos de manera más consciente y reflexiva que antes. Esto no quiere decir, sin embargo, que hubieran desaparecido los problemas de cálculo. Al contrario, llama la atención el hecho de que entre estudiantes de Bachillerato se observen serias dificultades para expresar matemáticamente hasta las relaciones más sencillas entre magnitudes, y que después de varias actividades trabajando con determinadas variables físicas, como la variación de entalpía, todavía se presenten problemas para expresar adecuadamente los signos de las cantidades y para operar con ellas. En cuestiones que no exigen más de tres o cuatro líneas de cálculos básicos, tareas como despejar una incógnita en una ecuación de primer grado seguía resultándoles difícil. Sin embargo, la reflexión sobre el significado de las cantidades numéricas y la elaboración de razonamientos para estimar el signo y el orden de magnitud de las cantidades les ayudaron a guiar los cálculos hacia la obtención de resultados con significado, aunque los resultados numéricos no fueran adecuados:

[Alfonso, Fi11(1)]: $\Delta G = \Delta H - T\boxed{\Delta T}$ $\Delta G = 178'3 - T0'1606$

$\Delta H > 0$ |

$\Delta S < 0$ | Espontánea a t° altas

$0 = 178 - T0'01606$ → $T = 1110\ K = 837\ °C$

[Adela, Fi11(1)]: $\Delta H = [-635'1 - 393'5] - [-1206'9] = 178'3\ KJ/mol$

$\Delta S = [39'7 + 213'8] = 160'6 \cdot 10^{-3}\ KJ/molK.$

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

$130'2 = 178'4 - T-160'6 \cdot 10^{-3}$

$-48'1 = -T160'6$

$T = 299'5\ K \approx 300\ K$

La tendencia a omitir las unidades de magnitud y los signos de las cantidades se redujo notablemente con respecto a la fase previa, a pesar de que los avances en las destrezas de estimación de cantidades eran lentos. También las dificultades sobre el significado del conjunto numérico $\mathbb{R}$ y de conceptos matemáticos básicos, como el de valor absoluto, fueron remitiendo a medida que se realizaban más actividades con cálculos matemáticos. No obstante, los estudiantes todavía se sentían inseguros de sus conocimientos cuando se les pedía que explicaran el significado de los valores numéricos con los que trabajaban, y en general se preguntaban unos a otros cuánto *daba* el resultado. Si en distintos grupos se había llegado a resultados diferentes, el nerviosismo se generalizaba, y volcaban sus esfuerzos en identificar dónde estaba el error de cálculo. La utilización del léxico científico no les producía tanta intranquilidad, aunque se percibía que tenían dificultades para expresar con claridad sus ideas.

Los valores de los parámetros estadísticos de las relaciones de ***EA2*** indican que las ideas de la ciencia escolar fueron aceptadas a pesar de los obstáculos que hubo que superar.

En la tabla siguiente se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades implementadas de *Termodinámica Química*, con la organización de datos que se ha explicado.

Tabla 21: activación de las relaciones del esquema de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** *(**EA2**) en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Fi01	33	6	13	(0,13)
Fi02	*60*	*6*	*10*	*(10,10)*
Fi03	*114*	*6*	*19*	*(19,19)*
Fi04	49	7	13	(2,12)
Fi05	*252*	*7*	*36*	*(36,36)*
Fi06	96	8	16	(0,16)
Fi07	81	8	16	(0,16)
Fi08	*120*	*6*	*20*	*(20,20)*
Fi09	*126*	*6*	*21*	*(21,21)*
Fi10	99	6	18	(13,18)
Fi11	131	6	24	(11,24)
Fi12	84	6	15	(9,15)
Fi13	140	8	26	(0,26)
Fi14	131	8	24	(8,23)
Fi15	147	7	26	(3,26)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, entre $A = 6$ y $A = 8$. En 4 actividades, hubo al menos un alumno que no utilizó ninguna relación de sus esquemas de razonamiento y acción: Benito en *Fi01*, Brais e Carlos en *Fi06* y *Fi07*, y otra vez Carlos en *Fi13*. En las 11 actividades restantes, todos los que realizaron las tareas activaron relaciones de ***EA2***.

Las estimaciones teóricas de las actividades de indagación/reestructuración son, al principio de la secuencia de enseñanza, superiores a los valores experimentales de las actividades de exploración y de aplicación correspondientes. De esto se infiere que los alumnos tardaron en aplicar parte de las relaciones de ***EA2*** que se habían trabajado en los textos de las actividades de indagación; pero no son resultados que indiquen un mal funcionamiento de la metodología, porque las primeras actividades de *Termodinámica Química* no piden explícitamente a los estudiantes que representen de manera algebraica los aspectos energéticos de los procesos que se plantean. Los resultados mejoran en la segunda mitad de la secuencia, donde los valores de los indicadores f y R crecen casi inmediatamente después de las actividades de indagación/reestructuración *Fi08* y *Fi09*. La incorporación de la terminología científica y matemática no se produjo inmediatamente después de la reestructuración de ideas, sino en la actividad siguiente, *Fi11*, y a partir de entonces se observa que las últimas actividades de aplicación sirvieron para que los estudiantes demostraran un mayor dominio del lenguaje científico y las representaciones algebraicas en Termodinámica Química. Así pues, la metodología ensayada ha tenido éxito en ayudar a los estudiantes a activar relaciones del esquema de acción ***EA2***.

Los valores de las duplas *(mín,máx)* muestran de nuevo que los máximos obtenidos por estimación para las actividades de indagación no son sustancialmente diferentes de las actividades de aplicación siguientes, mientras que en los valores mínimos sí hay mucha diferencia. De aquí se deduce que algunos de los alumnos lograron una buena activación de relaciones del esquema ***EA2*** en las actividades de indagación, mientras que otros debieron de activar bastantes menos relaciones. Estos resultados son consistentes con los que se obtuvieron para los esquemas de razonamiento y para el esquema de acción ***EA1***.

Las actividades que mejor activación de relaciones lograron son, en este orden, *Fi05* (indagación), seguida de *Fi13*, *Fi14* y *Fi15*, confirmando la consolidación de los esquemas ***EA2*** a medida que los alumnos interiorizaban progresivamente el vocabulario científico y las representaciones matemáticas. Las actividades que menos ayudaron a la activación de relaciones de ***EA2*** fueron *Fi01*, *Fi02* y *Fi04*, las primeras actividades de la serie, que son más identificativas y descriptivas, y

requieren menos representaciones científicas en su resolución. Las otras actividades descriptivas (*Fi06*, *Fi07*, *Fi12*) tienen valores de activación intermedios entre los máximos y los mínimos de la secuencia.

La dispersión de los datos se interpreta como en los esquemas anteriores: los bajos resultados de Carlos y Brais son los que amplían las duplas (*min*,*máx*), y se deben a las actitudes negativas que mantenían estos dos alumnos.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA2***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos. Se categorizaron en los niveles y subniveles de la tabla siguiente.

Los niveles *x* de ordenación de los ***EA2*** idiosincrásicos son tres, de x_1 a x_3 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). Se han establecido cuatro subdivisiones para el nivel x_2, y tres subdivisiones para x_3.

Tabla 22: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA2, ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	x_3			x_2				x_1	-		
	x_{3c}	x_{3b}	x_{3a}	x_{2d}	x_{2c}	x_{2b}	x_{2a}				
ALUMNOS	**Clara**	**Alfonso**	**Carlos**	**Brais**	**Darío**	**Adela**	**Ana**	**Benito**	**Diana**	**Brais**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	💣			
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	💣	✓	💣			
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	.	.	.	.	.	.	.	.			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

INTERNA											
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✖	✓			
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CALOR se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	✓	✓	✓	✓	✖	✖	✖	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	✓	✓	·	·	·	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	✓	·	✓	·	·	·	·	·			
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	·	·	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	✖	✖	✖	✓	✖	✖	✖	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	✓	✖	✖	✓	✓	✖	✖	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	✖	✖	✖	✓	✓	✖	✖	✓			

A continuación se describen los esquemas ***EA2*** prototípicos de cada nivel, y se comentan las características que explican su categorización en $EA2_{Fi} = [x_1, \ldots, x_3]$.

Nivel $EA2_{Fi} = x_3$: subniveles x_{3c}, x_{3b} y x_{3a}

El número de relaciones activadas entre el alumno del nivel más acorde con la ciencia escolar, y el de menor nivel, es pequeño, pero en el proceso de construcción de los esquemas de los distintos alumnos se observan peculiaridades que justifican la inclusión de los ***EA2*** en niveles y subniveles diferentes.

Subnivel $EA2_{Fi} = x_{3c}$: esquema de Clara

Esta alumna tiene el esquema más acorde con el referencial ***EA2***, porque activó 40 de las 41 relaciones de la ciencia escolar que se pretendían construir. Ya en ***Fp*** había manifestado algunas dificultades en la utilización del ***léxico científico*** (sobre todo en la *precisión del lenguaje*), y en ***Fi*** los conflictos de expresión persisten, aunque en menor medida que en la secuencia de Termoquímica. Demostró que ya dominaba la simbolización de la cantidad de sustancia involucrada en las reacciones químicas por medio de la estequiometría, y su vocabulario se hizo más preciso:

[Clara, Fi12(x)]: Que o forno o non estar totlmente pechado cando a pedra se descompón o CO_2 escapa polo tanto sería un proceso irreversible xa que nos falta materia.

Cando a temperatura é igual a 837 ºC a reacción estará en equilibrio.

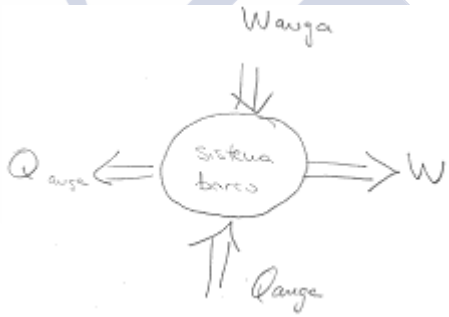
A presión no forno máx sería 1 atm. (…)

Las dos únicas manifestaciones escritas en las que se encuentran expresiones alejadas de la ciencia escolar son las siguientes:

[Clara, Fi10(1)]: (…) Que si temperatura baixa a enerxía libre (ΔG) aumenta polo tanto o proceso invirtese e vólvese espontáneo

[Clara, Fi12(1)]: Cando se achega a máis ou menos 837 ºC a rocha vaise desfacendo e transformandose CaO e CO_2 e cando se apaga o forno a rocha comezaría a arrefriar

Clara e Carlos son los únicos alumnos que elaboraron una representación icónica, en su respuesta a la actividad *Fi04*. La flecha de la izquierda, rotulada con la aclaración "Q_{auga}", es una aportación suya al diagrama esquemático que trazó el profesor en la pizarra durante la puesta en común de ideas:



[Clara, Fi04(x)]:

Subnivel $EA2_{Fi} = x_{3b}$: esquema de Alfonso

Las respuestas de este alumno son mucho mejores que las de ***Fp***. Recuérdese que, al principio de la fase previa, sus guiones de trabajo contenían un gran número de expresiones ambiguas, tautologías, anacolutos, faltas de concordancia entre sujeto y predicado, etc. A lo largo de la fase de intervención, cada vez presentan menos expresiones alejadas de las ideas de la ciencia escolar, e incluso en aquellas manifestaciones escritas en las que el lenguaje todavía es cotidiano, la ordenación de las ideas es mucho más clara que al comienzo de la intervención.

[Alfonso, Fi04(x)]: Non é posible xa que a auga non pode entrar no barco e cederlle o calor. Con isto non é posible producir enerxía xa que a auga non se vai quentar ó entrar no barco. Para isto faría falta combustible. Ademais a auga non pode facer un traballo sobre o barco.

Durante la segunda secuencia de actividades, la tendencia de Alfonso a olvidar signos y unidades en la expresión de las cantidades de magnitud desaparece. La única relación que no activó con respecto a Clara es ***R34***, que se refiere a la contribución personal en la elaboración de representaciones icónicas: no

realizó ningún dibujo o diagrama en las 15 actividades implementadas en ***Fi***, y la activación de la relación ***R33*** en su esquema responde a la asignación por defecto correspondiente a una actividad de indagación (*Fi05*).

Subnivel $EA2_{Fi} = x_{3a}$: esquema de Carlos

El esquema de Carlos es casi tan completo como el de Clara, con la diferencia de que su modificación del diagrama realizado por Rodrigo en la pizarra en *Fi04* no le sirvió para tomar alguna decisión sobre la cuestión planteada:

[Carlos, Fi04(x)]:

En ***Fi***, las manifestaciones de este alumno contienen bastantes menos expresiones alejadas de la ciencia escolar que antes, aunque todavía tendía a olvidarse de las unidades de magnitud cuando se trataba de presentar resultados:

[Carlos, Fi04(x)]: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

$0 = 234 - 0'279T \rightarrow \boxed{T = 840}$ Magnetita → $\boxed{T = 940}$

De hecho, en ninguna actividad llegó a utilizar las unidades de kJ/mol para expresar las cantidades de la variación de energía de Gibbs.

Parece que se cansó de repetir que la intervención del profesor le había ayudado mucho a cambiar sus ideas, y en ***Fi*** se limitó a dejar las preguntas en blanco salvo que pudiera responderlas en tres o cuatro líneas (18 *items* en blanco de un total de 29).

Nivel $EA2_{Fi} = x_2$: subniveles x_{2d}, x_{2c}, x_{2b} y x_{2a}

Cada subnivel de los descritos incluye el esquema de un único alumno.

Subnivel $EA2_{Fi} = x_{3c}$: esquema de Brais

El esquema de Brais es similar al de Carlos, porque tampoco utilizó las unidades de ΔG ni elaboró representaciones icónicas en sus respuestas. En su ***EA2***, las relaciones ***R37 – R40*** figuran como activadas por defecto, porque las respuestas de este alumno son en general muy breves y solamente contienen ideas de las que estaba muy seguro; de ahí que el lenguaje utilizado por Brais no contenga expresiones alternativas. En todo caso, parece que desde la fase previa remitió su tendencia a utilizar el lenguaje científico de manera poco reflexiva:

[Brais, Fi14(1)]: Porque a partir dun mol de sólido consigues moitos moles de gas, a reacción é exotérmica e moi rápida.

También empezó a utilizar la estequiometría para expresar la relación molar entre las sustancias involucradas en las reacciones químicas. En cuanto a la utilización de la simbología matemática, los resultados no son concluyentes: en algunos casos omitía las unidades de las cantidades de magnitud, en otros no. Parece que se vio obligado a abandonar su costumbre de esperar a que sus compañeros hicieran los cálculos por él, porque Benito apenas le hablaba, Berta no asistía a las clases, y los tres integrantes de G_A, aunque colaboraban de buena gana con Clara y Darío, no parecían tan dispuestos a compartir sus ideas con Brais. Al verse solo, decidió responder algunas de las cuestiones, y dejar en blanco otras. En algunos casos, comenzaba la actividad y de repente, sin motivo aparente, la abandonaba, ya sea para dedicarse a responder otro apartado, o para mirar a uno y otro lado sin continuar con su trabajo. Rodrigo, el profesor, consideraba que por más empeño docente que pusiera, no sería capaz de aportar alicientes a este alumno para que cooperara en las clases, porque a Brais "le era más cómodo pasar el curso así".

Subnivel $EA2_{Fi} = x_{3c}$: esquema de Darío

Al principio de la fase previa, la utilización del lenguaje científico por parte de Darío era bastante desordenada, y fue mejorando con la realización de las actividades. El proceso de aprendizaje del lenguaje científico continuó durante la fase de intervención, y las observaciones e interpretaciones de este alumno se hicieron más detallistas en cuanto a las magnitudes termodinámicas:

[Darío, Fi06(x)]: Que a entropía dunha reacción depende da orden, e cantas mais moleculas distintas hau mais entropía, ao igual que hay mais entropia no estado gas.

[Darío, Fi11(1)]: (…) Non, porque as condicións da rocha calcaria non son as mesmas a unha temp que a outra (varia a entropia da rocha)

Solamente utilizó algunas expresiones alternativas para explicar el significado de ecuaciones que quedaban fuera de su comprensión:

[Darío, Fi10(x)]: Que através da enerxia libre de Gibs podemos saber se unha reaccion e espontanea ou non, seguindo unha serie de regras establecidas por Gibbs

Además, no siempre utilizó las unidades de J/mol·K para expresar las cantidades de la variación de entropía: en *Fp15* copió el valor de ΔS de Ana y lo expresó como una variación de entalpía, con unidades de kJ/mol.

Subnivel $EA2_{Fi} = x_{3c}$: esquema de Adela

Esta alumna expresó siempre la entropía y la variación de entropía con unidades de kJ/mol, por considerar que la magnitud *S* es análoga de *H* y *G*, y por lo tanto las tres tienen que tener las mismas unidades de medida.

En sus manifestaciones escritas todavía se observan influencias del lenguaje cotidiano y algunas expresiones incoherentes:

[Adela, Fi01(1)]: (…) Calor, ya que desprenderia energía

[Adela, Fi04(x)]: Para que el agua se enfrie o se caliente hace falta la intervención de un agente externo.

[Adela, Fi01(x)]: (…) Los procesos espontaneos pueden ser endotermico endotermico, exotermicos (…)

[Adela, Fi10(1)]: (…) La reacción de formación del $CaCO_3$ es espontanea

la " " " " $CaCO_3$, CaO son espontaneo

(…)

Sus problemas con la consistencia en la simbología ya se han comentado: esta alumna no tenía clara la terminología endotermia/exotermia.

Subnivel $EA2_{Fi} = x_{3c}$: esquema de Ana

Los esquemas ***EA2*** de Ana también contienen como idea alternativa a la ciencia escolar la utilización de las unidades de kJ/mol para la entropía y la variación de entropía. Además, su utilización de la estequiometría de reacción en los cálculos de las magnitudes termodinámicas no era adecuada al final de la segunda unidad didáctica ensayada.

Su expresión escrita es poco legible a veces por problemas con la puntuación de los textos, aunque las ideas que exprese coincidan con las científicas:

[Ana, Fi14(2)]: Apórtase enerxía por un proceso de calor ó sistema, que fai que se produzca un aumento de temperatura porudcese un aumento do volume que da lugar a unha explosión na que se libera enerxía (onda expansiva),

[Adela, Fi04(x)]: Para que a auga quente se enfríe é necesaria a intervención dun axente externo.

Sus manifestaciones escritas revelan que esta alumna adoptó el lenguaje de la ciencia escolar y mejoró en su utilización del lenguaje matemático, que al principio de la fase previa era bastante deficiente. Sin embargo, seguía sintiéndose insegura de sus propios conocimientos en Matemáticas: tendía a repetir varias veces la misma operación para asegurarse de que los números eran *correctos*, preguntaba a otros compañeros si obtenían el mismo resultado que ella, y si la respuesta era negativa, tendía a borrar sus cálculos y comenzar de nuevo.

Nivel $EA2_{Fi} = x_1$: esquema de Benito

Benito no expresó en las unidades internacionales las cantidades de magnitud de algunas variables, como la variación de la temperatura o el trabajo. Tampoco utilizó siempre los convenios de escritura del lenguaje matemático:

[Benito, Fi01(1)]: (…) 3/2(–393'5) –(–824'2) = 234 ΔH (…)

En su esquema no se ha asignado por defecto la activación de las relaciones que tienen que ver con las representaciones icónicas, porque Benito no asistió a la sesión de clase en la que se desarrolló la actividad *Fi05*.

Esquema *EA3*: *Representación gráfica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química.*

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de acción ***EA3*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron durante la fase de intervención de la investigación. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***G***.

Tabla 23: *frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción* ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** *(EA3), extraídas de las actividades de la unidad didáctica Termodinámica Química*

RELACIÓN	*f*	Cód
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	3	*G01*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	1	*G02*
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	1	*G03*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	2	*G04*
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	2	*G05*
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	2	*G06*
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	2	*G07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	12	*G08*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	6	*G09*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	12	*G10*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	2	*G11*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	2	*G12*
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	2	*G13*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	2	*G14*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	0	*G15*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	0	*G16*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	2	*G17*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	2	*G18*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	0	*G19*
EJES presentan DIVISIONES	2	*G20*
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	2	*G21*
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	2	*G22*
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	1	*G23*
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	0	*G24*
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	2	*G25*
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	0	*G26*
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*G27*

CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	0	*G28*
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	2	*G29*
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	2	*G30*
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	2	*G31*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	2	*G32*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	2	*G33*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	0	*G34*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	0	*G35*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	0	*G36*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	0	*G37*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*G38*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	0	*G39*

El esquema referencial de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** se compone de 39 relaciones, y los datos muestran que los estudiantes activaron 26, aunque todas con frecuencias de utilización bajas, porque en ninguna actividad se pedía explícitamente a los alumnos que realizaran algún tipo de representación gráfica. Queda a juicio del profesor qué ocasiones son mejores para introducir conocimientos del dominio simbólico que sirvan para representar en un diagrama o gráfica los aspectos energéticos de los procesos químicos. Una sugerencia posible es trazar la gráfica de entropía frente a temperatura para los sistemas de la actividad *Fi06*.

De las 39 relaciones del referencial ***EA3***, 21 eran ya conocidas de cursos anteriores. Al comparar las frecuencias de activación f y los correspondientes promedios para estas relaciones y las 18 nuevas, se obtiene: $f_{(no\ nuevas)} = \mathbf{30}$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = \mathbf{1}$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} =$; y $f_{(nuevas)} = \mathbf{44}$, con promedio de activación $\bar{x}_{(nuevas)} = \mathbf{2}$ y $\sigma_{(nuevas)} = \mathbf{4}$. Si se tienen en cuenta las dificultades iniciales de estos alumnos para trabajar con magnitudes físicas y con la representación matemática de valores de magnitud, el hecho de que se obtengan frecuencias de activación favorables a las relaciones nuevas con respecto a las ya conocidas, es hasta cierto punto un éxito: a pesar de los problemas de aprendizaje, se llegó a una efectividad aceptable en la elaboración de gráficas termodinámicas. Pero solamente por parte de algunos alumnos, como indica la elevada dispersión que se alcanza en $\sigma_{(nuevas)}$ con una frecuencia tan baja.

En la tabla siguiente se recoge información sobre la activación de las relaciones de ***procesos termodinámicos***, para cada una de las 15 actividades implementadas de la unidad didáctica Termodinámica Química. Los datos de la tabla se organizan en las columnas que se explican en (VER).

Tabla 24: a*ctivación de las relaciones del esquema de acción* ***procesos termodinámicos*** ***(EA3)*** *en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención*

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Fi01	0	6	0	(0,0)
Fi02	*0*	*6*	*0*	*(0,0)*
Fi03	*0*	*6*	*0*	*(0,0)*
Fi04	0	7	0	(0,0)

Fi05	*0*	*7*	*0*	*(0,0)*
Fi06	0	8	0	(0,0)
Fi07	0	8	0	(0,0)
Fi08	*12*	*6*	*2*	*(2,2)*
Fi09	*18*	*6*	*3*	*(3,3)*
Fi10	0	6	0	(0,0)
Fi11	0	6	0	(0,0)
Fi12	44	6	23	(1,23)
Fi13	0	8	0	(0,0)
Fi14	0	8	0	(0,0)
Fi15	0	7	0	(0,0)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, con un número de asistentes que varió entre $A = 6$ y $A = 8$.

Según los datos de la tabla, en 3 de las 15 actividades implementadas de *Termodinámica Química*, los alumnos activaron relaciones de ***EA3***; pero dos de estas actividades son de indagación/reestructuración y tienen una frecuencia de activación que no responde a datos de aula, sino a una estimación de los investigadores para comprobar la efectividad de las actividades de aplicación en la promoción de la transferencia de conocimiento.

En el siguiente apartado se describen los esquemas idiosincrásicos ***EA3***.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

Los niveles x de ordenación de los ***EA3*** idiosincrásicos son cuatro, de x_1 a x_4 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar). El número de subdivisiones da una idea de la confusión que demostraron los alumnos en la fase de intervención.

Tabla 25: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA3, Representación gráfica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	x_4	x_3	x_2					x_1	-		
			x_{2b}	x_{2a}							
ALUMNOS	**Adela**	**Alfonso**	**Benito**	**Brais**	**Ana**	**Clara**	**Darío**	**Carlos**	**Ana**	**Berta**	**Diana**
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✹	✹	✹	·	✖	✖	✖	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la	✓	·	·	·	·	·	·	·			

LEGIBILIDAD											
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	✓	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✗	·	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	✗	·	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✗	·	✓	✓	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EJES presentan DIVISIONES	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	✓	·	·	·	·	·	·	·			
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	·	·	·	·	·	·	·	·			

Dada la poca complejidad de los esquemas ***EA3*** prototípicos de cada nivel, no es necesario detallar las características que explican su categorización en niveles.

Esquema *EA4*: *Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*

Se presentan aquí los esquemas de acción de ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** que desarrollaron los alumnos a medida que realizaban las actividades de la fase de intervención.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge los esquemas de acción ***EA4*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las actividades de Termodinámica Química. Se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** están representadas por el símbolo ***E***.

Tabla 26: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4), extraídas de las actividades de Termodinámica Química

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	64	*E01*
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	64	*E02*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	68	*E03*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	95	*E04*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	93	*E05*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	86	*E06*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	36	*E07*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	90	*E08*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	90	*E09*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	22	*E10*
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	22	*E11*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	0	*E12*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	0	*E13*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	0	*E14*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	0	*E15*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	0	*E16*
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*E17*
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	68	*E18*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	68	*E19*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	61	*E20*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	87	*E21*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	12	*E22*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	63	*E23*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	6	*E24*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	27	*E25*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{reversible}/T$ (MACROSCÓPICA)	13	*E26*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	0	*E27*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	12	*E28*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{expansión} = -p \cdot \Delta V$	7	*E29*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{sistema} = -\Delta E_{entorno}$	32	*E30*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	25	*E31*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	64	*E32*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS	38	*E33*

MAGNITUDES TERMODINÁMICAS		
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	0	*E34*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	3	*E35*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	23	*E36*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	38	*E37*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	23	*E38*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	58	*E39*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	25	*E40*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	54	*E41*
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	79	*E42*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	70	*E43*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	2	*E44*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	54	*E45*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	23	*E46*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	58	*E47*
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	23	*E48*
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	58	*E49*
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	30	*E50*
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	64	*E51*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	7	*E52*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	20	*E53*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	1	*E54*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	1	*E55*
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	1	*E56*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	13	*E57*
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	13	*E58*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	63	*E59*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	63	*E60*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	64	*E61*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	44	*E62*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	27	*E63*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	5	*E64*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	23	*E65*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	59	*E66*

El esquema referencial de acción *Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química* se compone de 66 relaciones, y los datos muestran que los estudiantes activaron 58 de ellas. Las relaciones de mayor frecuencia se refieren a la ***lectura comprensiva de las cuestiones planteadas*** para analizar los procesos termodinámicos y realizar inferencias, así como a la obtención de datos de fuentes bibliográficas y la transformación de datos mediante el tratamiento matemático de los datos numéricos. Destaca positivamente la interpretación de los resultados, para la cual se basaron en la ***realización de inferencias*** a partir de las ***dependencias de las magnitudes termodinámicas***, las cuales se expresan mediante ***ecuaciones matemáticas***. Destaca negativamente la baja frecuencia con la que recurrieron a fuentes bibliográficas alternativas a los enunciados de las tareas o a las tablas de

datos termoquímicos; esta tendencia poco deseable está relacionada con los aspectos actitudinales, al igual que la baja frecuencia que se observa en la toma de decisiones fundamentada en criterios de tipo no termodinámico (sociales, medioambientales y tecnológicos).

En todo caso, las 8 relaciones del esquema referencial que no se utilizaron no restan gran capacidad de transferencia de conocimientos al esquema ***EA4***.

Consideramos que los esquemas iniciales de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** son adecuados una vez terminada la fase de intervención, aunque los conocimientos conceptuales de los alumnos no se pueden considerar satisfactorios para el nivel de 2º de Bachillerato. En el dominio microscópico, las ideas iniciales de los estudiantes no estaban lo suficientemente articuladas como para constituir esquemas de razonamiento útiles en la elaboración de interpretaciones profundas sobre las reacciones químicas, y a lo largo de las quince actividades implementadas de la secuencia didáctica se observa un progreso en las destrezas y estrategias de resolución de problemas, paralela a la construcción de esquemas de razonamiento de mayor capacidad descriptiva e interpretativa.

De las 66 relaciones del esquema referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, 49 eran ya conocidas, por los cursos anteriores. Las frecuencias de activación f y sus correspondientes promedios de activación para estas relaciones conocidas y para las 17 relaciones nuevas son: $f_{(no\ nuevas)} = 1900$, con promedio de activación $\bar{x}_{(no\ nuevas)} = 39$ y desviación típica $\sigma_{(no\ nuevas)} = 32$ y $f_{(nuevas)} = 502$, con $\bar{x}_{(nuevas)} = 30$, y $\sigma_{(nuevas)} = 21$; con respecto a la fase previa, se mantienen la frecuencia y el promedio de activación, al tiempo que cae la desviación típica. Estos datos estadísticos indican que la secuencia didáctica ensayada ha tenido éxito en la construcción de un esquema de acción útil en la resolución de cuestiones problemáticas de base científica, teniendo en cuenta el nivel inicial de conocimientos conceptuales y procedimentales del alumnado.

La tabla siguiente recoge información sobre la activación de las relaciones de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, para cada una de las 15 actividades implementadas de la unidad sobre Termodinámica Química, tal y como se ha hecho para los demás esquemas.

Tabla 27: ac*tivación de las relaciones del esquema de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4) en cada una de las 15 actividades implementadas de la fase de intervención*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Fi01	82	6	28	(0,28)
Fi02	*90*	*6*	*15*	*(15,15)*
Fi03	*126*	*6*	*21*	*(21,21)*
Fi04	163	7	31	(8,26)

Fi05	*147*	*7*	*21*	*(21,21)*
Fi06	96	8	16	(0,16)
Fi07	141	8	28	(0,28)
Fi08	*126*	*6*	*21*	*(21,21)*
Fi09	*132*	*6*	*22*	*(22,22)*
Fi10	230	6	39	(6,38)
Fi11	243	6	38	(20,38)
Fi12	126	6	22	(20,22)
Fi13	239	8	44	(0,44)
Fi14	209	8	35	(14,33)
Fi15	252	7	44	(8,44)

Recuérdese el número de alumnos que realizaron las actividades de *Termodinámica Química*: 10 se presentaron a las actividades (Débora, con asistencia a una sola sesión, deja de formar parte de la muestra), 8 entregaron los guiones de trabajo (Berta y Diana no lo hicieron), y la asistencia a las sesiones de clase fue irregular, con un número de asistentes que varió entre $A = 6$ y $A = 8$.

Como era de esperar, todas las actividades de *Termodinámica Química* condujeron a la activación de *EA4*, y las frecuencias alcanzan sus máximos en aproximadamente la mitad de la secuencia, coincidiendo con las actividades de exploración posteriores a la presentación de la energía de Gibbs como criterio para el estudio de la espontaneidad y el equilibrio de los procesos químicos. Nuevamente, *Fi06*, muy centrada en la construcción del concepto de desorden, tiene una frecuencia de activación menor que las actividades anterior y posterior a ella. El salto de valor que que se produce en la activación desde las actividades de indagación/reestructuración *Fi02*, *Fi03*, *Fi08* y *Fi09*, hacia las correspondientes actividades de aplicación, demuestra el éxito de la metodología ensayada para construir relaciones de la ciencia escolar que se transfieren eficazmente a la interpretación de los aspectos energéticos de procesos físicos y químicos diversos, en situaciones nuevas y en contextos diferentes.

Los indicadores *f* y *R* apuntan hacia una activación creciente de las relaciones de ***EA4***, y las duplas *(min,máx)* dan información valiosa que ayuda a afinar el perfil de activación a lo largo de la unidad didáctica:

La dispersión de los datos es irregular y no parece seguir una secuencia definida más que la que se debe a la ausencia de algunos alumnos a determinadas sesiones y a la ausencia de respuestas escritas en algunos casos. Los resultados de ***EA4*** se parecen a los de ***EA1*** en que apuntan hacia una construcción de conocimientos procedimentales acompañada de una cierta *estratificación* de los esquemas, a medida mejoraban los ***EA***s de los alumnos que asistían a clase y ponían empeño en su trabajo diario, y se estancaban o no se ponían en valor los de los alumnos que presentaban problemas de tipo actitudinal.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, se elaboraron los correspondientes

esquemas de acción de los alumnos, que aparecen recogidos en la tabla siguiente. Los esquemas ***EA4*** se han categorizado en tres niveles *x* de ordenación, de x_1 a x_3 (de menor a mayor coincidencia con el referencial de la ciencia escolar).

Tabla 28: relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA4, ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	x_3		x_2					x_1	-		
	x_{3b}	x_{3a}	x_{2c}	x_{2b}	x_{2a}						
ALUMNOS	**Clara**	**Alfonso**	**Adela**	**Brais**	**Ana**	**Benito**	**Darío**	**Carlos**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	·	·	·	·	·	·	·	·			
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de	✓	·	✖	✓	✓	✓	✓	·			

ECUACIONES TERMOQUÍMICAS											
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	✓	·	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{reversible}/T$ (MACROSCÓPICA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{expansión} = -p \cdot \Delta V$	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{sistema} = -\Delta E_{entorno}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	💣	💣	✖	💣	✖	✖	✖	✓			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✖	💣	💣	·	✖	💣	✖	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	·	✓	·	·	·	✓	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	·	✓	·	✓	·			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	✓	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

analizar los COSTES DEL PROCESO											
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	✓	✓	✓	·	·	✖	✖	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

Dado que los esquemas ***EA4*** prototípicos de cada nivel de ordenación son relativamente fáciles de interpretar una vez se han leído las descripciones de los ***ER4*** de ***Fp***, en lugar de detallar las características que explican su categorización en los niveles $\boldsymbol{EA4_{Fi}} = [x_1,...,x_3]$, hemos considerado más útil analizar el número de relaciones que activaron los estudiantes mientras realizaban las actividades de la secuencia didáctica *Termodinámica Química*. Para ello se ha elaborado la serie de tablas que vienen a continuación, y que tienen la finalidad de reflejar el aprendizaje alcanzado por los once adolescentes como consecuencia de la interacción con la segunda propuesta de enseñanza ensayada. En las tablas se muestran los valores de los siguientes indicadores:

En primer lugar, el porcentaje de activación (***%Act***), para mostrar qué fracción de las relaciones se activó en los distintos esquemas de razonamiento y en el macroesquema ***ERT***. El ***%Act*** de un esquema se define como la cantidad porcentual de relaciones activadas, frente al total de relaciones del esquema.

En segundo lugar, se utiliza el porcentaje de adquisición (***%Adq***), para mostrar qué fracción representan las relaciones activadas con respecto a las que sería deseable que utilizaran en la fase de intervención, para los distintos esquemas de razonamiento y en el macroesquema ***ERT***. El ***%Adq*** asociado a un esquema se define como la cantidad porcentual de relaciones activadas, frente al número de relaciones que se esperaban utilizar a lo largo de la fase de intervención, y que se ha estimado mediante la resolución de las actividades por parte de los investigadores.

Estas tablas se detallan para los datos de los esquemas de razonamiento y de acción, con sus correspondientes macroesquemas:

Tabla 29: r*esumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3 y ER4 y ER5, y del macroesquema de razonamiento ERT, en el desarrollo de la unidad didáctica Termodinámica Química.*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***ER1***	***ER2***	***ER3***	***ER4***	***ER5***	***ERT***
Nº de relaciones del esquema	59	61	52	43	29	244
Nº de relaciones que se esperaba activar en *Fi*	58	61	52	41	26	238
Nº de relaciones activadas por	51	49	49	39	16	204

los alumnos en *Fi*						
% Activación	**86**	**80**	**94**	**91**	**55**	**84**
% Adquisición	**88**	**80**	**94**	**95**	**62**	**86**

Los datos muestran que las actividades de la secuencia *Termodinámica Química* tuvieron éxito en la adquisición del 80% de las relaciones que era deseable que se activaran durante la fase de intervención. La utilización de las relaciones de ***ER1***, ***ER3*** y ***ER4*** se sitúa en torno al 90%, y se confirma que los alumnos dieron, en conjunto, una importancia mayor a la interpretación dinámica de los procesos (***ER3***) que a la descricpión de las características que los definen (***ER2***). El porcentaje de adquisición más bajo se corresponde con ***ER5***, del cual se hicieron útiles poco más de la mitad de las relaciones esperadas. Para rastrear hasta qué punto la activación de ***ER5*** se vio obstaculizada por problemas de aprendizaje relacionados con elementos de otros esquemas que establecen uniones puente con ***ER5***, se han elaborado las tablas siguientes, que recogen, respectivamente, los datos porcentuales para las relaciones macroscópicas y para las microscópicas.

Tabla 30: resumen de los datos porcentuales para las relaciones macroscópicas de los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3 y ER4 y ER5, y del macroesquema de razonamiento ERT, en el desarrollo de la unidad didáctica Termodinámica Química

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***ER1***	***ER2***	***ER3***	***ER4***	***ER5***	***ERT***
Nº de relaciones macroscópicas del esquema	42	56	48	37	0	183
Nº de relaciones macroscópicas que se esperaba activar en *Fi*	42	56	48	37	0	183
Nº de relaciones macroscópicas activadas por los alumnos en *Fi*	34	48	45	34	0	161
% Activación	**81**	**86**	**94**	**92**	**-**	**88**
% Adquisición	**81**	**86**	**94**	**92**	**-**	**88**

El mismo perfil que se ha descrito para el conjunto de todas las relaciones, y con resultados similares, se observa para las relaciones macroscópicas de la Termodinámica Clásica. Estos datos demuestran que los alumnos construyeron, a lo largo de la fase de intervención, esquemas de razonamiento y acción que contienen la mayoría de las relaciones macroscópicas que se pretendían activar.

Tabla 31: resumen de los datos porcentuales para las relaciones microscópicas de los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3 y ER4 y ER5, y del macroesquema de razonamiento ERT, en el desarrollo de la unidad didáctica Termodinámica Química

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***ER1***	***ER2***	***ER3***	***ER4***	***ER5***	***ERT***
Nº de relaciones microscópicas del esquema	17	5	4	6	29	61
Nº de relaciones microscópicas que se esperaba activar en *Fi*	16	5	4	4	26	55
Nº de relaciones microscópicas activadas por los alumnos en *Fi*	17	1	4	5	16	43

% Activación	**100**	**20**	**100**	**83**	**55**	**70**
% Adquisición	**106**	**20**	**100**	**125**	**62**	**78**

Los porcentajes de adquisición para las relaciones microscópicas no son tan homogéneas, aunque solamente en un caso (el esquema ***ER2***) el dato porcentual cae por debajo del 50%. Por lo tanto, las actividades de la secuencia *Termodinámica Química* tuvieron, en conjunto, una efectividad aceptable en la construcción de relaciones adecuadas sobre el dominio microscópico de representación del conocimiento. Los resultados confirman que los modelos de enlace y de reacción química que utilizaban los alumnos (representados en ***ER5***) eran más incompletos que los modelos de partículas (***ER1***), como ya se ha comentado en los apartados anteriores: inicialmente, a los estudiantes les costaba utilizar relaciones de la ciencia escolar que tratan sobre la interpretación microscópica de la dinámica de los procesos químicos, aunque con ayuda del profesor lograron activar esquemas sobre estos aspectos.

La tabla siguiente contiene información sobre el éxito que tuvo la secuencia didáctica *Termodinámica Química* en ayudar a los alumnos de la muestra a activar las relaciones de la ciencia escolar que no eran familiares para ellos:

Tabla 32: r*esumen de los datos porcentuales de las relaciones de los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3 y ER4 y ER5, y del macroesquema de razonamiento ERT, que eran desconocidas para los estudiantes al principio de la fase de intervención*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***ER1***	***ER2***	***ER3***	***ER4***	***ER5***	***ERT***
Nº de relaciones desconocidas para el alumnado	43	37	44	40	11	175
Nº de relaciones desconocidas para el alumnado,que se esperaba activar en *Fi*	42	37	44	38	8	169
Nº relaciones desconocidas para el alumnado, activadas en *Fi*	37	30	41	36	6	150
% Activación	**86**	**81**	**93**	**90**	**55**	**86**
% Adquisición	**88**	**81**	**93**	**95**	**75**	**89**

Este análisis de los esquemas de razonamiento idiosincrásicos pone en evidencia una buena acogida (a corto plazo) de la metodología, y la efectividad de la secuencia de actividades *Termodinámica Química* para hacer explícitos los esquemas de los alumnos y favorecer su evolución.

Con la finalidad de comparar hasta qué punto los alumnos partieron de sus conocimientos previos para construir los nuevos, se ha elaborado la tabla siguiente, en la que se resumen los datos porcentuales correspondientes a las relaciones ya familiares para el alumnado, de entre las que constituyen los esquemas de razonamiento acordes con la ciencia escolar.

Tabla 33: resumen de los datos porcentuales de las relaciones de los esquemas de razonamiento ER1, ER2, ER3 y ER4 y ER5, y del macroesquema de razonamiento ERT, que eran conocidas por el alumnado al principio de la fase de intervención

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***ER1***	***ER2***	***ER3***	***ER4***	***ER5***	***ERT***
Nº de relaciones ya conocidas del esquema	16	24	8	3	18	69
Nº de relaciones ya conocidas que se esperaba activar en *Fi*	16	24	8	3	18	69
Nº de relaciones ya conocidas activadas por los alumnos en *Fi*	14	19	8	3	10	54
% Activación	**88**	**79**	**100**	**100**	**56**	**78**
% Adquisición	**88**	**79**	**100**	**100**	**56**	**78**

Los datos muestran que los estudiantes utilizaron la mayoría de las relaciones que ya conocían sobre los sistemas materiales y los cambios que experimentan en su estado como consecuencia de la interacción con el entorno en unas condiciones dadas, así como sobre la naturaleza y constructos teóricos de la dinámica de los procesos naturales, incluso en el caso de las relaciones microscópicas. De todas maneras, se siguen detectando ideas alternativas relacionadas con los modelos de partículas, enlace químico y reacción química.

Desglosando los datos por individuos, se obtienen las tablas siguientes, en las que se recogen los valores de ***% Adq*** para los esquemas de razonamiento ***ER1***, ***ER2***, ***ER3***, ***ER4***, ***ER5*** y ***ERT***, respectivamente.

Tabla 34: resumen de los datos porcentuales del esquema ER1, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

ER1	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	84	84	88	74	79	0	86	0	86	88	0
% *Adq* relaciones macroscópicas	79	79	81	69	71	0	79	0	79	81	0
% *Adq* relaciones microscópicas	100	100	106	88	100	0	106	0	106	106	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	81	81	88	81	81	0	88	0	88	88	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	86	86	88	71	79	0	86	0	86	88	0

Todos los alumnos alcanzan buen porcentaje de utilización de las relaciones deseables; los valores más bajos de ***% Adq*** rondan el 70%, lo que indica que la unidad didáctica *Termodinámica Química* ayudó a los alumnos a construir esquemas de razonamiento ***ER1*** que son acordes con la ciencia escolar. No se observan grandes diferencias entre los ***% Adq*** asociados a las relaciones ya conocidas para los alumnos, y las que se construyeron a lo largo de la implementación de la secuencia

de actividades. Así pues, los estudiantes aceptaron plenamente los nuevos constructos científicos para construir sus descripciones e interpretaciones.

Tabla 35: resumen de los datos porcentuales del esquema ER2, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

ER2	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	70	51	77	79	43	0	52	0	51	79	0
% *Adq* relaciones macroscópicas	75	54	82	84	45	0	55	0	54	84	0
% *Adq* relaciones microscópicas	20	20	20	20	20	0	20	0	20	20	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	75	71	79	79	63	0	79	0	75	79	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	68	38	76	78	30	0	35	0	35	78	0

Los **% *Adq*** más bajos se alcanzan en las relaciones microscópicas, cuyos datos indican que la utilización de los modelos microscópicos relacionados con la descripción de los procesos termodinámicos no fue aceptable en el conjunto de la muestra. En cuanto a las relaciones macroscópicas, solamente el ***%Adq*** de Carlos se considera no aceptable. Para cuatro alumnos, no se observan grandes diferencias entre los valores de las relaciones nuevas y de las ya conocidas, aunque hay un pequeño sesgo a favor de éstas; pero otros cuatro estudiantes (Alfonso, Carlos, Adela y Clara) tienen ***%Adq*** insuficientes de las relaciones que se pretendía construir entre las dos unidades didácticas ensayadas.

Al término de la fase previa, se había constatado que los alumnos de la muestra tenían bastantes lagunas de conocimiento e ideas alternativas relacionadas con los modelos de reacción química. La posterior intervención de aula, una vez superado el cambio metodológico, ayudó a adquirir una buena cantidad de conocimiento a la mitad de los alumnos que se presentaron a la segunda propuesta de enseñanza, y guió la evolución de sus conocimientos hacia las ideas de la ciencia escolar. Pero la otra mitad de los estudiantes presentes no llegaron a alcanzar una activación aceptable de los ***ER2***. Estos resultados contrastan con los de ***ER1***, esquema en el que todos los alumnos, también Carlos, obtuvieron resultados aceptables. Así pues, se concluye que la eficacia de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química en la activación de ***ER2*** se ha puesto de manifiesto para la mitad del alumnado, y que las causas de este aprendizaje irregular están en la resistencia del alumnado a elaborar descripciones detalladas sobre los procesos termodinámicos propuestos, salvo que se les pida de manera explícita.

Tabla 36: resumen de los datos porcentuales del esquema ER3, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

ER3	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	85	90	65	85	56	0	88	0	85	83	0
% *Adq* relaciones macroscópicas	88	90	71	88	60	0	92	0	85	85	0
% *Adq* relaciones microscópicas	50	100	0	50	0	0	50	0	75	50	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	88	100	75	88	75	0	88	0	88	88	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	84	89	64	84	52	0	89	0	84	82	0

Los resultados de ***ER3*** son algo menos homogéneos que los de los ***ER1***, con dos alumnos (Brais e Carlos) que presentan valores inferiores al 80% en los ***% Adq*** global, aunque ninguno baja del 50%; pero ambos tienen ***% Adq*** inferiores al 50% en las relaciones microscópicas. Las diferencias entre los valores asociados a las relaciones ya conocidas para los estudiantes y las relaciones nuevas superan el 10% para Alfonso, Brais e Carlos, que prefirieron elaborar sus razonamientos sobre las ideas de ***ER3*** que ya habían aprendido anteriormente (aunque en todos los casos utilizan las relaciones nuevas en más de un 50%); pero en sus compañeros las diferencias no son significativas. Estos datos revelan que la secuencia *Termodinámica Química* ha tenido éxito en promover la construcción de las relaciones de ***ER3***.

Tabla 37: resumen de los datos porcentuales del esquema ER4, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

ER4	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	95	80	66	80	41	0	80	0	73	83	0
% *Adq* relaciones macroscópicas	92	78	68	86	41	0	78	0	73	84	0
% *Adq* relaciones microscópicas	125	100	50	25	50	0	100	0	75	75	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	100	100	100	100	33	0	100	0	33	100	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	95	79	63	79	42	0	79	0	76	82	0

Los datos indican que la activación de ***ER4*** fue aceptable durante la fase de intervención, salvo en el caso de Carlos: asistiendo a solamente 3 de las 8 sesiones de la unidad didáctica, es realmente difícil que este chico lograra desarrollar una visión global de la Termodinámica Química como disciplina científica. Los datos de Brais

también están vinculados a sus faltas de asistencia: no estuvo en 3 de 8 clases, y aún así obtiene en torno a dos tercios del ***%Adq***.

Tabla 38: resumen de los datos porcentuales del esquema ER5, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

ER5	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	50	58	15	42	19	0	54	0	54	46	0
% *Adq* relaciones macroscópicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% *Adq* relaciones microscópicas	50	58	15	42	19	0	54	0	54	46	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	39	50	6	39	6	0	44	0	50	44	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	75	75	38	50	50	0	75	0	63	50	0

En cuanto al esquema ***ER5***, los porcentajes para la mayoría de los integrantes de la muestra está en torno al 50%. Cuatro alumnos superan dicho valor, otros dos (Benito y Darío) se encuentran entre el 40% y el 50%, y los ***% Adq*** de Brais e Carlos son significativamente más bajos que los de sus compañeros. Estos datos reflejan que la efectividad de las actividades de *Termodinámica Química* ha sido irregular. Parece que las causas de la baja activación están en los débiles y fragmentarios conocimientos iniciales del alumnado, de hecho los valores de ***%Adq*** para las relaciones ya conocidas de cursos pasados solamente llegan al 50% para Alfonso y Clara. Sin embargo, todos los alumnos, salvo Brais, alcanzaron un porcentaje de adquisición aceptable para las relaciones microscópicas nuevas, que se pretendían introducir mediante las actividades de las dos unidades didácticas ensayadas. En resumen, la metodología propuesta fue eficaz en ayudar a los alumnos a lograr un aprendizaje aceptable (al menos a corto plazo) de los modelos de partículas, enlace químico y reacción química, aun con las limitaciones que les suponía no disponer de unos conocimientos conceptuales quer fueran más útiles como organizadores previos de las ideas que se iban a desarrollar.

*Tabla 39: resumen de los datos porcentuales del macroesquema **ERT**, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención*

ERT	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	79	74	68	75	52	0	74	0	71	79	0

% *Adq* relaciones macroscópicas	83	74	76	82	54	0	75	0	72	84	0
% *Adq* relaciones microscópicas	67	73	44	53	44	0	69	0	69	64	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	70	72	62	71	52	0	74	0	71	74	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	83	74	71	77	51	0	73	0	71	81	0

De los resultados de ***% Adq*** correspondientes al macroesquema de razonamiento ***ERT*** se concluye que la realización de las actividades de *Termodinámica Química* ayudó a los alumnos a utilizar de acuerdo con las ideas de la ciencia escolar más del 50% de las relaciones que se pretendían activar a lo largo de la fase de intervención, y siete de los once estudiantes superan el 70% de activación, aunque ninguno llega al 80%. Como era de esperar, las descripciones e interpretaciones son fundamentalmente macroscópicas, pero los alumnos han aceptado y aplicado los modelos del dominio microscópico hasta un punto que podemos considerar aceptable si atendemos a su nivel de conocimientos inicial, salvo Brais e Carlos, que no alcanzan un ***%Adq*** aceptable en este sentido. El progreso en el aprendizaje se observa claramente en alumnos como Adela, que en sus manifestaciones de la fase previa apenas hacía referencia a las partículas y los enlaces químicos, y defendía ideas bastante ajeadas de la ciencia escolar. La comparación entre los ***% Adq*** de las relaciones ya conocidas, y las que se pretendían construir durante la fase de intervención, demuestra que todos los estudiantes (Carlos incluido) aceptaron las nuevas ideas científicas hasta el punto de utilizarlas en una extensión comparable a las ya conocidas.

De todos los resultados expuestos hasta este punto, se concluye que la unidad didáctica *Termodinámica Química* ayudó a los alumnos a construir unos esquemas de razonamiento más completos y adecuados que los que tenían al comienzo de la intervención. Para comprobar hasta qué punto ha llegado a ser significativo el aprendizaje realizado (estable en el tiempo a medio plazo), se requiere el contraste de los resultados iniciales de ***Ci*** (***Capítulo IV***) con los resultados finales, que se detallan en los ***Capítulos VI*** y ***VII***.

En cuanto a los esquemas de acción, en las tablas que vienen a continuación se recoge el número de relaciones activadas en los esquemas de acción como consecuencia de la realización de las actividades de *Termodinámica Química*, con la finalidad de profundizar en el análisis del aprendizaje que surgió de la interacción con la primera propuesta de enseñanza ensayada. Las tablas detallan los valores de los indicadores ***%Act*** y ***%Adq***:

Tabla 40: resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción EA1, EA2, EA3 y EA4, y del macroesquema de acción EAT, en el desarrollo de la unidad didáctica Termodinámica Química

ESQUEMA DE ACCIÓN	*EA1*	*EA2*	*EA3*	*EA4*	*EAT*
Nº de relaciones del esquema	41	40	39	66	186
Nº de relaciones que se esperaba activar en *Fi*	41	40	39	66	186
Nº de relaciones activadas por los alumnos en *Fi*	41	39	26	58	164
% Activación	**100**	**98**	**67**	**88**	**88**
% Adquisición	**100**	**98**	**67**	**88**	**88**

De las relaciones activadas a lo largo de la fase de intervención, no todas eran desconocidas para el alumnado. Con la finalidad de indagar en las diferencias que se produjeron en la utilización de relaciones nuevas y de las ya trabajadas en cursos pasados, se han elaborado más tablas, información sobre el éxito que tuvo la secuencia didáctica *Termodinámica Química* en ayudar a los alumnos de la muestra a activar las relaciones de la ciencia escolar no familiares para ellos:

Tabla 41: resumen de los datos porcentuales de las relaciones de los esquemas de acción EA1, EA2, EA3 y EA4, y del macroesquema de acción EAT, que eran desconocidas para los estudiantes al principio de la fase de intervención

ESQUEMA DE ACCIÓN	*EA1*	*EA2*	*EA3*	*EA4*	*EAT*
Nº de relaciones desconocidas para el alumnado	17	13	18	17	65
Nº de relaciones desconocidas para el alumnado, que se esperaba activar en *Fi*	17	13	18	17	65
Nº relaciones desconocidas para el alumnado, activadas en *Fi*	17	12	10	16	55
% Activación	**100**	**92**	**56**	**94**	**85**
% Adquisición	**100**	**92**	**56**	**94**	**85**

Nuevamente, los porcentajes de adquisición son muy elevados, salvo para ***EA3***, que se trabajó en menor extensión.

La tabla siguiente ayuda a visualizar hasta qué punto los alumnos partieron de sus conocimientos previos (relaciones ya conocidas) para construir esquemas de acción acordes con la ciencia escolar.

Tabla 42: resumen de los datos porcentuales de las relaciones de los esquemas de acción EA1, EA2, EA3 y EA4, y del macroesquema de acción EAT, que eran conocidas por el alumnado al principio de la fase de intervención

ESQUEMA DE ACCIÓN	*EA1*	*EA2*	*EA3*	*EA4*	*EAT*
Nº de relaciones ya conocidas del esquema	24	27	21	49	121
Nº de relaciones ya conocidas que se esperaba activar en *Fi*	24	27	21	49	121
Nº de relaciones ya conocidas activadas por los alumnos en *Fi*	24	27	16	42	109
% Activación	**100**	**100**	**76**	**86**	**90**

% Adquisición	100	100	76	86	90

Según los datos, se activó la mayoría de las relaciones ya conocidas sobre la identificación y descripción de los sistemas materiales y los procesos físicos y químicos, sobre la utilización del lenguaje científico y la simbología matemática, y sobre las destrezas y estrategias en la resolución de cuestiones problemáticas en Ciencias. En cuanto a la realización e interpretación de representaciones gráficas, en este caso sobre los aspectos energéticos de los procesos termodinámicos, se observa nuevamente que se presentaron dificultades, y en una extensión comparable a la de la activación de las relaciones nuevas. De los resultados de la construcción de ***EA3*** y de la comparación de los datos, se concluye que los alumnos tenían muy pocos conocimientos iniciales sobre la lectura y realización de gráficas y diagramas, y que los principales obstáculos a la activación de esquemas de la ciencia escolar radicaban en problemas de aprendizaje relacionados con conceptos de la Matemática: los números reales, el plano cartesiano, los pares de valores…; y con la representación de las dependencias entre magnitudes físicas. A medida que realizaron las actividades propuestas, los alumnos reconocieron dependencias conceptuales entre magnitudes termodinámicas (por ejemplo, que la cantidad energía del sistema depende de la temperatura, o que presión y volumen son inversamente proporcionales entre sí), pero tuvieron que vencer dificultades en la simbolización de las relaciones entre magnitudes utilizando fórmulas y ecuaciones.

Desglosando los datos por individuos, se obtienen las tablas siguientes, en las que se recogen los valores de ***% Adq*** para los esquemas de acción ***EA1***, ***EA2***, ***EA3***, ***EA4*** y ***EAT***, respectivamente.

Tabla 43: resumen de los datos porcentuales del esquema EA1, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

EA1	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	100	100	100	100	83	0	100	0	95	100	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	100	100	100	100	92	0	100	0	92	100	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	100	100	100	100	71	0	100	0	100	100	0

Casi todos los alumnos utilizaron el 100% de las relaciones deseables. Por lo tanto, la unidad didáctica *Termodinámica Química* les ayudó a construir esquemas de acción ***EA1*** acordes con la ciencia escolar.

Tabla 44: resumen de los datos porcentuales del esquema EA2, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

EA2	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora
% *Adq* del número total de relaciones	95	95	90	80	93	0	95	0	98	93	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	96	96	93	81	96	0	96	0	100	96	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	92	92	85	77	85	0	92	0	92	85	0

Los **% *Adq*** para ***EA2*** no alcanzan el éxito de los de ***EA1***, porque aquél es un esquema que representa acciones más demandantes en lo procedimental y conceptual. Aunque la activación de los ***EA2*** es aceptable, se han detectado dificultades de aprendizaje relacionadas con las representaciones léxicas, algebraicas e icónicas de los aspectos energéticos de los procesos químicos. En conjunto, la propuesta de enseñanza ha sido útil en la construcción de ***EA2*** acordes con la ciencia escolar, pero las ideas alternativas iniciales sobre álgebra y cálculo obstaculizaron la puesta en juego de destrezas y estrategias en la traducción de la información termodinámica al lenguaje matemático.

Tabla 45: resumen de los datos porcentuales del esquema EA3, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

EA3	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora
% *Adq* del número total de relaciones	8	51	8	10	0	0	59	0	0	8	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	0	62	0	5	0	0	76	0	0	0	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	17	39	17	17	0	0	39	0	0	17	0

Tabla 46: resumen de los datos porcentuales del esquema EA4, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención

EA4	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora
% *Adq* del número total de relaciones	77	80	77	79	52	0	79	0	82	79	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	76	80	73	76	53	0	78	0	82	76	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	82	82	88	88	47	0	82	0	82	88	0

La tabla indica que la activación de ***EA4*** fue un éxito durante la fase de intervención. Obsérvese la (casi) total y generalizada aceptación de las relaciones de la ciencia escolar que se pretendían construir. Así pues, las destrezas y estrategias

científicas para la resolución de cuestiones problemáticas se vieron muy favorecidas por la metodología ensayada.

*Tabla 47: resumen de los datos porcentuales del macroesquema **EAT**, correspondientes al aprendizaje realizado por los alumnos en la fase de intervención*

EAT	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**
% *Adq* del número total de relaciones	72	82	70	69	56	0	83	0	71	72	0
% *Adq* relaciones ya conocidas para los alumnos	72	84	70	69	61	0	86	0	74	72	0
% *Adq* relaciones no conocidas para los alumnos	71	77	71	69	48	0	77	0	66	71	0

De los **% *Adq*** correspondientes al macroesquema de acción ***EAT*** se concluye que la realización de las actividades de *Termodinámica Química* ayudó a casi todos los alumnos (a todos salvo Carlos) a utilizar de acuerdo con las ideas de la ciencia escolar un 60% de las relaciones de los esquemas de acción que se pretendían activar a lo largo de la fase de intervención.

De todos los resultados expuestos hasta este punto, se concluye que la unidad didáctica *Termodinámica Química* ayudó a los estudiantes a construir unos más completos y adecuados que los que tenían al comienzo de la intervención.

V.3.2. Análisis mediante competencias

En este apartado se analizan las competencias que demostraron los alumnos en sus respuestas escritas a las quince actividades que conformaron la implementación de la fase de intervención ***Fi***. Se evalúan seis competencias (competencia científica, competencia matemática, competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, competencia social y ciudadana, competencia en comunicación lingüística y competencia en aprender a aprender), con especial énfasis en la competencia científica, que se ha desglosado en tres competencias (capacidades) más concretas: identificación de cuestiones científicas, explicación científica de fenómenos y utilización de pruebas científicas, además de las actitudes hacia la Ciencia.

De las manifestaciones escritas que produjeron los estudiantes en sus respuestas a las actividades, se han extraído los elementos de la competencia (unidades de análisis) que vertebran las competencias (capacidades) descritas. A cada elemento de la competencia se le adjudicó una puntuación numérica de acuerdo con los indicadores de la competencia (***IC***s), cuyos valores se obtienen mediante la suma de los valores de los factores de la competencia (***FC***s) que se presentaron en el ***Volumen A***. La evaluación de los aspectos actitudinales se realizó

siguiendo la escala de puntuaciones que se describió en el ***Capítulo III***.

Como en los capítulos anteriores, la determinación de los niveles de competencia se realizó mediante la comparación de los valores de competencia idiosincrásicos con los dos valores referenciales de la ciencia escolar, $\boldsymbol{VRC_1}$ y $\boldsymbol{VRC_2}$, que permiten definir los niveles $\boldsymbol{NC = NC_1,\ldots,NC_5}$. Los resultados de este análisis revelan el aprendizaje que realizaron los alumnos como consecuencia de su interacción con la segunda unidad didáctica ensayada, *Termodinámica Química*, en términos de las competencias que fueron capaces de poner en juego en sus respuestas en un entorno colaborativo, con ayuda de sus compañeros y el profesor.

En las tablas que vienen a continuación se recogen los valores medios, aproximados por redondeo a la unidad, para los niveles de las distintas competencias que demostraron los alumnos en la intervención. Dichos valores se han hallado calculando el promedio estadístico de los niveles de competencia para las 10 actividades de *Termodinámica Química* en las que los alumnos deben elaborar respuestas escritas a cuestiones de base científica. Las dos últimas columnas de las tablas incluyen el promedio estadístico de los niveles de competencia para el conjunto de la muestra y la desviación típica correspondiente.

Tabla 48: promedio de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en las actividades de la segunda unidad didáctica

ALUMNO	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**	**Promedio**	**Desviación típica**
Competencia en el conocimiento e interacción con el mundo físico	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,64**	**0,81**
Identificación de cuestiones científicas	**4**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**4**	**3**	**1**	**2,18**	**1,33**
Reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia	**4**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**4**	**3**	**1**	**2,27**	**1,35**
Reconocer la base científica de la cuestión (conocimientos de la Ciencia y sobre la Ciencia)	**4**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**2**	**1**	**2,00**	**1,10**
Utilizar estrategias de búsqueda de información científica, comprenderla y seleccionarla	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**5**	**4**	**1**	**2,82**	**1,83**
Reconocer los rasgos claves de la investigación científica	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**5**	**4**	**1**	**2,64**	**1,80**
Explicación científica de los fenómenos	**5**	**5**	**2**	**5**	**1**	**1**	**2**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,00**	**1,95**
Aplicar (transferir) los conocimientos de la Ciencia	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**5**	**4**	**1**	**2,82**	**1,83**
Describir y explicar fenómenos científicamente y predecir cambios	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**5**	**1**	**2,64**	**1,96**
Reconocer descripciones, explicaciones y predicciones	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**4**	**2**	**1**	**2,18**	**1,25**
Utilización de pruebas científicas	**5**	**5**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**2**	**1**	**2,91**	**2,02**

Interpretar datos y pruebas, elaborar y comunicar conclusiones	**5**	**5**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**5**	**4**	**1**	**2,91**	**1,87**
Argumentar en pro y en contra de las conclusiones, e identificar supuestos, pruebas y razonamientos	**5**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**2**	**1**	**1,91**	**1,30**
Reflexionar sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,36**	**0,50**
Actitudes hacia la Ciencia	**5**	**5**	**1**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,09**	**2,02**
Interés hacia la Ciencia y la actividad científica. Apoyo a la investigación científica. Concepción de Ciencia	**3**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,82**	**0,87**
Sentido de la responsabilidad sobre sí mismo, los recursos y el entorno	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,64**	**0,81**

Alcanzaron un nivel de la competencia científica aceptable cinco alumnos: Ana y Alfonso, con un nivel de competencia medio, y Adela (también del grupo G_A), Clara y Darío con un nivel medio-bajo (estos alumnos, en principio, procedían de G_C y G_D, pero por la ausencia de sus respectivos compañeros pasaron a constituir un nuevo grupo de trabajo.

Los resultados de la caracterización final parecen reflejar ciertos rasgos del trabajo cooperativo realizado a lo largo de la fase de intervención:

En la identificación de cuestiones científicas y en la explicación de fenómenos destacan Ana, Alfonso y Clara, seguidos por Darío. Estos alumnos elaboraron respuestas detalladas, sobre todo en las actividades que incluían la interpretación de los cálculos que se utilizan en Termodinámica, y se conformaron con representar sus ideas en pocas palabras que apoyaran sus desarrollos matemáticos. La explicación científica de los fenómenos es muy destacable en el caso de Ana, Alfonso y Clara (no así en Adela, que se queda en un discreto NC_2 a causa de las dificultades en la transferencia de los conocimientos adquiridos a la interpretación de los aspectos energéticos de nuevos hechos y fenómenos); también Benito y Darío utilizan de manera muy eficaz sus conocimientos en la explicación, justificación y predicción de aspectos termodinámicos.

En la utilización de pruebas científicas toman ventaja Ana y Clara, que se esmeran en desarrollar al detalle todas las ideas que van surgiendo en los debates en gran grupo. Adela, abrumada por la necesidad de asimilar más conceptos y modelos en menos tiempo, no alcanza niveles tan altos, como tampoco Darío, que en algunos casos no llega a terminar de elaborar respuestas a las cuestiones y deja indicados los resultados. Pero donde se observa una caída en los niveles de competencia es en las actitudes hacia la ciencia, que solamente son aceptables para cuatro alumnos: Ana, Alfonso, Clara y Darío.

Tabla 49: promedio de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en las actividades de la segunda unidad didáctica

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia matemática	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,27**	**0,47**
Identificar situaciones que exigen conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos	**3**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,00**	**1,00**
Utilizar el lenguaje matemático para cuantificar aspectos relacionados con los fenómenos naturales	**5**	**5**	**1**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,09**	**2,02**
Utilizar técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar expresar datos e ideas	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**4**	**3**	**1**	**2,55**	**1,63**
Realizar cálculos sobre los fenómenos naturales	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Realizar representaciones gráficas sobre fenómenos naturales	**5**	**5**	**3**	**4**	**2**	**2**	**4**	**2**	**4**	**3**	**1**	**3,18**	**1,33**

Son solamente tres los alumnos que alcanzan un nivel aceptable (NC_2), por la mayor dificultad de los cálculos y el elevado nivel de abstracción de los conceptos que se simbolizan matemáticamente. Los niveles de la competencia (capacidad) de cálculo son muy bajos, y reflejan las numerosas dificultades que se presentaron a lo largo de la intervención para operar con los datos termodinámicos y llegar a resultados sobre los aspectos energéticos de los procesos naturales. Sin embargo, las competencias en la realización de representaciones gráficas crecen de manera espectacular, y la media de los alumnos se sitúa en el nivel medio NC_3.

Tabla 50: promedio de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, que demostraron los alumnos en las actividades de la segunda unidad didáctica

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en comunicación lingüística	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,36**	**0,50**
Comprender e interpretar mensajes acerca de las Ciencias	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos con contenido científico	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**4**	**1**	**2,82**	**1,94**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la comunicación de ideas (saber decir)	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,09**	**0,30**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción del conocimiento (saber hacer)	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,36**	**0,50**
Saberes actitudinales relacionados con las tareas comunicativas: utilizar el lenguaje de forma razonada y	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**

dialogante en la regulación de conductas y emociones													
Competencia en el tratamiento de la información y Competencia digital	**5**	**5**	**5**	**5**	**2**	**1**	**5**	**1**	**5**	**3**	**1**	**3,45**	**1,86**
Aplicar las formas específicas del trabajo científico para buscar, recoger, seleccionar la información, procesarla y presentarla	**5**	**5**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**1**	**1**	**2,45**	**1,75**
Utilizar las TIC para comunicarse, recabar información, visualizar situaciones, obtener y tratar datos	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5**	**5,00**	**0,00**

Alcanzan un nivel aceptable de competencia lingüística cuatro alumnos, Ana, Alfonso, Adela y Clara, que son los que más completan sus respuestas a las actividades (Alfonso recoge buena parte de las ideas de sus compañeras, pero en todo caso podemos considerar que las maneja). Obsérvese el bajísimo nivel de competencia en comprender e interpretar mensajes de la Ciencia: los alumnos necesitaban la ayuda del profesor para entender los textos de las actividades. Sin embargo, una vez lograban comprender los rasgos más destacados de la cuestión, aquéllos que no presentaron grandes problemas actitudinales demostraron una muy buena utilización del vocabulario científico en la expresión de sus ideas; la única excepción es Benito, que, enfadado con su compañero de grupo (Brais), había dejado de esforzarse en cubrir los guiones de trabajo para que no se los copiaran. En general, la sistematización de las descripciones e interpretaciones es más adecuada que al inicio de la intervención.

Tabla 51: promedio de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en las actividades de la segunda unidad didáctica

ALUMNO	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**	**Promedio**	**Desviación típica**
Competencia social y ciudadana	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,36**	**0,50**
Comprender y explicar de manera científica problemas de interés social	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,45**	**0,52**
Aplicar el conocimiento sobre debates esenciales para el avance de la Ciencia, para comprender cómo han evolucionado las sociedades y para analizar la sociedad actual	**3**	**5**	**1**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,91**	**1,64**
Comportarse individualmente según las normas y valores democráticos, al relacionarse con los demás y afrontar los conflictos	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**4**	**3**	**1**	**2,55**	**1,63**
Cooperar y comprometerse en el trabajo científico y en las relaciones interpersonales	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Competencia en aprender a aprender	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**

Iniciarse en el aprendizaje y ser capaz de continuarlo de manera autónoma (saber ser)	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**5**	**3**	**1**	**2,73**	**1,79**
Desenvolverse ante las incertidumbres: tratando de buscar respuestas, admitiendo diversas soluciones ante un mismo problema	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1,36**	**0,50**
Habilidad para organizar el tiempo de forma efectiva y perseverancia en el aprendizaje	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2,00**	**0,00**

Los datos de la competencia social y ciudadana indican que existe una clara dicotomización de la muestra: los tres estudiantes de G_A y Clara son los únicos que están en el nivel NC_2, aceptable, pero medio-bajo; los demás, por su dejadez en la realización de las actividades, se quedan en el nivel más bajo.

En cuanto a la competencia en aprender a aprender, queda claro que los alumnos de G_A, Clara, Benito y Darío tienen suficiente independencia y autonomía de aprendizaje como para poder continuarlo de manera bastante autónoma si quieren, pero su habilidad para estudiar y organizar su tiempo de aprendizaje se acerca al mínimo de competencia. Obsérvese que Adela, una alumna bastante insegura de sí misma, se sentía confiada en el seno de su grupo y ponía tanto esfuerzo de su parte como sus compañeros, en teoría más capaces por no tener limitaciones debidas a enfermedades.

Los resultados del análisis por competencias vuelven a concordar con los del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción: a lo largo de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química, los alumnos construyeron un conocimiento que se puede considerar aceptable, en tanto en cuanto demuestra avances con respecto a la situación inicia; pero es insuficiente para 2º de Bachillerato en cuanto a la movilización del conocimiento de la ciencia escolar para describir e interpretar los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos. La expresión de las ideas es todavía descuidada en general, a pesar de que los alumnos han interiorizado el lenguaje científico en lo esencial, y las actitudes de los alumnos no favorecen el aprendizaje. Solamente aquéllos que han establecido una relación colaborativa dentro de un grupo de trabajo desarrollan las nuevas ideas en una extensión adecuada: los alumnos del grupo G_A y el binomio de Clara y Darío; Benito se mantiene en un discreto segundo plano, aunque sus resultados van mejorando progresivamente desde el momento en que entra a trabajar con los otros dos grupos y se aleja de su grupo de origen, G_B. La tabla siguiente, creada con el propósito de analizar las distintas actividades en función de su puntuación en los distintos factores de la competencia científica, muestra esta tendencia.

Para que el análisis por competencias aporte más datos sobre el proceso de aprendizaje realizado, es conveniente comparar las competencias que movilizaron los alumnos a medida que se realizaban las actividades de la segunda unidad didáctica. Con esta finalidad se ha elaborado la tabla que viene a continuación, en la

que se recogen los promedios de la puntuación porcentual que obtienen las distintas actividades de la fase de intervención en todos y cada uno de los factores de la competencia científica, para cada una de las 10 actividades de la fase previa en las que se les pedía que elaboraran respuestas escritas para resolver cuestiones de base científica. Los promedios están calculados para los ocho alumnos de los que se tienen datos de la fase de intervención ***Fi*** (todos, salvo Berta, Diana y Débora).

Tabla 52: promedios de los porcentajes de los factores de competencia científica que demostraron los alumnos en las distintas actividades de la fase de intervención ***Fi***

ACTIVIDAD	Fi01	Fi04	Fi06	Fi07	Fi10	Fi11	Fi12	Fi13	Fi14	Fi15
POTENCIALIDAD INTERPRETATIVA	34	96	61	82	65	81	92	79	113	79
Dominios de representación del conocimiento	33	88	63	83	65	82	92	81	110	80
Modelos microscópicos sobre la naturaleza y estructura de la materia	44	229	41	70	54	63	65	58	166	61
Categorías ontológicas	34	104	60	85	69	83	96	80	112	80
Operaciones epistémicas	33	88	63	83	65	82	93	81	110	80
POTENCIALIDAD DE ACTIVACIÓN	25	56	50	66	54	69	70	68	83	67
Importancia de los constructos en la tarea	14	26	30	41	37	46	41	45	48	45
Novedad de los constructos	33	94	63	84	65	82	92	81	110	80
Explicitación en el planteamiento de la tarea	33	88	63	83	65	82	92	81	110	80
Fuente que suministra los datos y pruebas sobre los que se trabaja	33	87	63	83	65	82	92	81	110	80
Etapas en la resolución de problemas	33	87	63	83	65	82	72	81	103	80
Reconocimiento y planteamiento de hipótesis	32	161	69	74	75	43	75	79	368	80
Transformación de datos	33	86	63	83	69	86	80	85	111	84
Obtención y presentación de resultados	32	79	75	74	46	67	22	67	56	65
Obtención de conclusiones	34	41	75	89	31	38	10	40	48	34
Toma de decisiones	0	0	0	0	58	67	0	70	62	78

Las actividades en las que más se potencia la integración de los tres dominios de representación del conocimiento son las últimas, especialmente *Fi14*, en la que se pide a los estudiantes que elaboren una interpretación sobre el comportamiento de las sustancias explosivas. En el caso de la puntuación por el desarrollo de modelos microscópicos sobre la estructura de la materia, destacan las actividades *Fi04* (sobre el móvil perpetuo de segunda especie) y de nuevo *Fi14*, mediante la que se pueden explicitar fácilmente los tres tipos de modelos que se pretenden construir: partículas, enlace y reacción química.

Estas dos actividades son las mismas en las que los estudiantes pusieron en juego más relaciones sobre las categorías ontológicas más abstractas (estados y procesos); precisamente en esta relación entre las puntuaciones de los tres primeros factores de la potencialidad de activación se pone de manifiesto el poder interpretativo de los modelos de la Ciencia en la elaboración de razonamientos que dan cuenta de los hechos, situaciones y fenómenos.

En cuanto a la profundidad de las operaciones epistémicas utilizadas, se

observa que las últimas actividades de aplicación son las que generaron mayor número de explicaciones, justificaciones y predicciones. Destaca, además de *Fi14*, la actividad *Fi12*, la única de la triada sobre la calcinación de la piedra caliza que no incluye cálculos numéricos, sino una justificación cualitativa del proceso que tiene lugar en el horno de calcinación (la cual requiere más desempeño cognitivo y la movilización de destrezas de razonamiento y argumentación de mayor nivel). De estos datos se infiere que el indicador de ***potencialidad interpretativa*** del método de análisis del aprendizaje por competencias, mide la calidad de los razonamientos que generan los alumnos en sus descripciones e interpretaciones cuando realizan las actividades propuestas.

El factor de ***potencialidad de activación*** muestra un perfil similar al de la potencialidad interpretativa, aunque con valores más bajos. Mide la capacidad de las tareas concretas para que los alumnos pongan de manifiesto su conocimiento, teniendo en cuenta la importancia de las ideas científicas en la resolución de la cuestión, la novedad de los constructos que se necesitan para resolverla, la mayor o menor inmediatez con la que se extraen los datos del enunciado, el tipo de fuente del que se extrae la información con la que se trabaja, y las etapas de la *praxis* científica que han de realizar los alumnos. Los resultados de la tabla anterior muestran que las actividades con mayor potencialidad de activación del conocimiento científico son las últimas actividades de aplicación, y en especial *Fi12* y *Fi14*.

Las actividades en las que menor rendimiento se observa son la primera, *Fi01*, y *Fi06*, demasiado volcada en la explicitación de un solo concepto (el de desorden termodinámico).

V.4. Contraste de la HT_2

La HT_2 hace referencia a los conocimientos que construyen los alumnos como consecuencia de su interacción con la metodología ensayada. Considerando que la producción oral y escrita revela la incorporación de las relaciones establecidas a lo largo de la intervención y, por tanto, pone de manifiesto la implicación de cada individuo en la evolución de su propio conocimiento, para contrastar la HT_2 se realizó un seguimiento del aprendizaje mediante el análisis de las manifestaciones orales y escritas que elaboraron los alumnos como respuesta a las quince actividades de la secuencia *Termodinámica Química*. Este seguimiento ha permitido comprobar cómo fue percibida la segunda propuesta de enseñanza ensayada, en contraposición con la singularidad e idiosincrasia de cada alumno. El aprendizaje realizado se evalúa mediante los dos métodos de análisis cualitativo cuyos resultados se describen en los apartados anteriores. Los enunciados operativos que se derivan de la HT_2 y se utilizan para ponerla a prueba, se confirman:

- Al comienzo de la unidad didáctica *Termodinámica Química*, los alumnos:

- no habían construido el significado de la espontaneidad de reacción en relación con el sentido de evolución de los sistemas químicos (no hasta *Fi08*);
- no justificaban la utilidad de la función de estado entropía para el estudio de la evolución de los sistemas químicos (comenzaron en *Fi01*);
- no daban significado macroscópico y microscópico al concepto de entropía (no hasta *Fi05-Fi06*);
- no interpretaban los principios segundo y tercero de la Termodinámica (ver *Fi04*);
- no comprendían el concepto de energía de Gibbs como función de estado extensiva que proporciona una condición de espontaneidad y equilibrio (presentada en *Fi018-Fi09*, se utiliza en las actividades de aplicación);
- no relacionaban la variación de la energía de Gibbs con el trabajo útil y con las variaciones de las funciones de estado entalpía y entropía (comenzaron en *Fi10*);
- no reconocían los criterios de espontaneidad de reacción referidos al universo (variación de la entropía del universo) y al sistema (variación de energía de Gibbs del sistema) (no hasta *Fi10*); y
- no habían desarrollado estrategias para obtener información sobre la espontaneidad de las reacciones químicas, interpretando datos termodinámicos de acuerdo con razonamientos fundamentados en los conceptos y los principios termodinámicos (se consolidaron en *Fi12*).

- La realización de las actividades de *Termodinámica Química* ayudó a los alumnos a mejorar significativamente sus conocimientos, en términos de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias científicas utilizadas.

La hipótesis $\boldsymbol{HT_2}$ queda confirmada tal como se enunció:

La aplicación en el aula de la metodología ensayada, favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento ***—Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción ***—Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con la ciencia escolar, que permiten a los estudiantes construir, estructurar y transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos. A lo largo de la

aplicación de la segunda propuesta en el aula, los estudiantes avanzan significativamente en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

VI. Valoración del conocimiento final de los estudiantes (caracterización final)

En este capítulo se aborda el contraste de la *Subhipótesis de trabajo 3.1* ($sHT_{3.1}$). Para ello, se centra la atención en los conocimientos que generó la metodología ensayada, y que los alumnos manifestaron en sus respuestas a las pruebas que constituyen la batería de caracterización final ***Cf***. La caracterización final de la muestra se realizó inmediatamente después de la aplicación de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química.

A lo largo del ***Capítulo VI*** se describe la toma, el tratamiento, la transformación y el análisis de los datos a partir de los cuales se han obtenido los resultados que han permitido contrastar la *Subhipótesis de trabajo 3.1* ($sHT_{3.1}$) de la presente investigación:

Planteamiento y fundamentación de la *sHT3*.1 (pág. 1075). Se plantea y justifica la primera de las dos subhipótesis en las que se ha operativizado la tercera hipótesis de trabajo de la investigación.

Aplicación y desarrollo de la batería final de pruebas (pág. 1077). Se detallan las pruebas que constituyen la batería de caracterización final de la muestra, ***Cf***.

Análisis y discusión de los resultados (pág. 1083). En este epígrafe se describen y analizan los resultados obtenidos en la caracterización final de la muestra. Nuevamente, estos resultados se han estudiado mediante dos tipos de análisis cualitativo, a cada uno de los cuales se dedica un epígrafe independiente:

Análisis item a item

En este apartado se describen los razonamientos justificativos y las estrategias de acción que utilizaron los alumnos en sus respuestas a cada una de las pruebas de caracterización final *Cf01,…,Cf07*, y se analizan las manifestaciones escritas más representativas.

Los enunciados de las pruebas se representan en el tipo de letra `Courier New`, y las manifestaciones escritas se transcriben en Comic Sans.

Una vez que se vaciaron las respuestas escritas de los estudiantes y se las organizó en las categorías que se describen en el ***Volumen A***, se obtuvieron los resultados del análisis *item* a *item* para las pruebas de caracterización final de la muestra, que son los siguientes:

VI.1.1.1. Descripción de resultados de la prueba *Cf01* de caracterización final

Actividad 01: las variaciones de entropía en los cambios de estado del agua

Completa la siguiente tabla, referida a los distintos procesos de

cambio de estado del agua.

En las celdas de "estado de agregación inicial" y "estado de agregación final", dibuja esquemáticamente cómo consideras que se encuentran las partículas en el estado físico correspondiente.

En las celdas de S_i, S_f y ΔS, anota cómo crees que serán los valores correspondientes en cada caso (mayores, iguales o menores que cero, grandes o pequeños en valor absoluto...)

CAMBIO DE ESTADO	**ESTADO DE AGREGACIÓN INICIAL**	**ESTADO DE AGREGACIÓN FINAL**	**ENTROPÍA INICIAL (S_i)**	**ENTROPÍA FINAL (S_f)**	**VARIACIÓN DE ENTROPÍA (ΔS)**
Ebullición	---------	---------	--------	---------	---------
Fusión	---------	---------	--------	---------	---------
Solidificación	---------	---------	--------	---------	---------
Condensación	---------	---------	--------	---------	---------
Sublimación s → g	---------	---------	--------	---------	---------
Sublimación g → s	---------	---------	--------	---------	---------

Cf01[1]

A. Elige un proceso de cambio de estado de entre los arriba descritos. Para este proceso, describe las diferencias que encuentras entre los estados inicial y final del sistema.

B. ¿Encuentras alguna relación entre la variación de entropía del sistema y las diferencias que has descrito? Justifica a qué se debe que exista / no exista tal relación.

Los resultados del *item Cf01(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	**Ana**	**Alfonso**	**Benito**	**Carlos**	**Adela**	**Clara**	**Darío**
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS							
La entropía *S* del sistema varía, durante las transiciones de fase, tal que su valor aumenta cuando el sistema evoluciona a una fase más condensada, y disminuye cuando el sistema pasa a una fase más fluida						✓	✓

El valor de la entropía *S* del sistema no varía durante las transiciones de fase	✓	✓	✓				✓
La entropía *S* del sistema varía durante las transiciones de fase, tal que su valor disminuye cuando el sistema evoluciona a una fase más condensada, y aumenta cuando el sistema pasa a una fase más fluida					✓		
RAZONAMIENTO JUSTIFICATIVO							
Relaciones termodinámicas							
La entropía *S* es función de estado (define el estado del sistema)	✗	✗	✗	✓	✗		✗
La entropía *S* es función de estado para los estados sólido y gas: problemas con el estado líquido	✓	✓	✓	✓			✓
No presentan confusiones con los cambios de fase		✓	✓	✓			✓
Adjudicación, para cada cambio de fase, de un valor de entropía positivo para el estado de agregación más ordenado, en contraposición al más desordenado, al cual adjudican un valor de entropía negativo	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Relaciones interpretativas - microscópicas							
Al cambiar el estado de agregación, no varía el tamaño de las partículas					✗	✓	✓
Al cambiar el estado de agregación, varía la distancia entre partículas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Al cambiar el estado de agregación, se ven afectadas las interacciones entre partículas	✓	✓		✓		✓	✓
LENGUAJE UTILIZADO	✓	✓	✓				
Lenguaje científico – escolar	✓		✓				
Utilización adecuada de S y ΔS						✗	✓
Lenguaje cotidiano					✓	✓	
"Interacción" como movimiento						✓	
"dispersión" como distancia entre partículas					✓		
SIMBOLOGÍA UTILIZADA							
Simbología científica – escolar							
Notación para la atribución de *S* al estado del sistema, inicial (S_i) o final (S_f)						✗	✗
Simbología no científica – escolar							
Simbología > (mayor que) y < (menor que) adjudicados en comparación con situaciones diferentes a la dada							✓
Confusión entre S y ΔS						✓	

VI.1.1.2. Descripción de resultados de la prueba *Cf02* de caracterización final

Actividad 02: espontaneidad de los cambios de estado del agua

Completa la siguiente tabla, referida a los distintos procesos de cambio de estado del agua.

En las celdas de ΔH y ΔS, anota como crees que serán los valores correspondientes en cada caso (mayores, iguales o menores que cero, grandes o pequeños en valor absoluto...)

En la celda "¿Espontáneo?", explica en qué condiciones consideras que es (o no es) espontáneo cada proceso de cambio de estado. Si a espontaneidad del proceso depende de algún factor o condición específica, indícalo.

CAMBIO DE ESTADO	VARIACIÓN DE ENTALPÍA (ΔH)	VARIACIÓN DE ENTROPÍA (ΔS)	¿ESPONTÁNEO?
Ebullición	----------	----------	----------

Fusión	----------	----------	----------
Solidificación	----------	----------	----------
Condensación	----------	----------	----------
Sublimación s → g	----------	----------	----------
Sublimación g → s	----------	----------	----------

Cf$_{02}$[1]

A. Elige un proceso de cambio de estado de entre los arriba descritos. Para este proceso, justifica los valores que has predicho para ΔH y ΔS.

Cf$_{02}$[2]

B. Encuentras alguna relación entre la espontaneidad y los valores de ΔH y ΔS para el proceso que has elegido? Justifica tu respuesta.

C. ¿Depende de algún otro factor o condición la espontaneidad del proceso que has elegido? Justifica a qué se debe que exista / no exista tal relación.

Los resultados de la prueba *Cf02* se describen en la siguiente tabla:

	Ana	Alfonso	Benito	Carlos	Adela	Clara	Darío
Recogen algún tipo de observación característica del fenómeno propuesto	✖	✖	✖		✖	✖	✓
Relacionan sus observaciones con las variaciones de las magnitudes fisicoquímicas que permiten estudiar la evolución del sistema	✖	✖	✖		✖	✖	✓
Relacionan sus observaciones con las interacciones sistema-entorno	✖	✖	✖		✖	✖	✓
Relacionan el proceso termodinámico con la evolución del sistema termodinámico	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran que los procesos directo e inverso se definen como tales al definir los estados inicial y final	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Hacen explícitas las causas por las que el sistema evoluciona mediante el proceso considerado	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan constructos del dominio macroscópico para explicar que el sistema evoluciona siguiendo el proceso considerado	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Construyen una explicación macroscópica sobre la evolución del sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Detallan los cambios que experimenta el sistema durante el proceso termodinámico	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen desde el punto de vista observacional los cambios que experimenta el sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Detallan los cambios que se producen en el comportamiento fisicoquímico del sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen los cambios que experimenta el sistema, utilizando magnitudes fisicoquímicas	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen los cambios del sistema utilizando magnitudes fisicoquímicas generales	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan la variación de la cantidad de materia del sistema para describir los cambios del mismo	✓						
Utilizan la variación de la cantidad de energía del sistema para describir los cambios del mismo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan el cambio en la composición en estados de agregación del sistema para describir los cambios del mismo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan el cambio en la composición química del sistema para describir los cambios del mismo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan la variación en el número de moles del sistema para describir los cambios del mismo	✓						
Utilizan las variaciones de las variables termodinámicas básicas para describir cómo evolucionan el entorno y/o el universo termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Reconocen cómo varían las condiciones de temperatura mientras tiene lugar el proceso	✓	✓	✓		✓		✓
Establecen una relación de causalidad entre el proceso y las condiciones de temperatura	✓	✓	✓		✓	✖	✓
Reconocen cómo varían las condiciones de presión mientras tiene lugar el proceso				✓			
El proceso sucede en unas condiciones de presión determinadas (reconocen la presión como una de las condiciones del proceso)				✓			
Establecen una relación de causalidad entre el proceso y las condiciones de presión				✓			
Construyen una interpretación de la dinámica del proceso, analizando su viabilidad termodinámica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que el proceso tiene un sentido determinado	✖	✓	✓		✖	✖	✓
Utilizan el concepto de espontaneidad (o viabilidad) de los procesos termodinámicos	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Reconocen la viabilidad termodinámica de un proceso determinado	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran que tiene lugar el proceso directo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran que tiene lugar el proceso inverso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran espontáneo todo proceso que es posible	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Consideran espontáneo todo proceso que sucede en las condiciones en las que se encuentra el sistema	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Consideran espontáneo todo proceso que sucede de manera natural (sin intervención externa)	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Describen cómo cambian su distribución energética las partículas del sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen cómo cambia el desorden termodinámico del sistema debido al proceso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
La evolución del sistema no viene determinada por el balance energético del proceso, sino por la energía movilizable (relacionada con la distribución energética)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación de la dinámica del proceso, analizando el estado de equilibrio que alcanza el sistema			✓				
El equilibrio es "estático" a nivel macroscópico: la falta de suficiente energía "intercambiable" hace que el sistema deje de experimentar cambios (el proceso se detiene)			✓				
Reconocen que pueden establecerse balances sobre el proceso termodinámico	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Establecen balances sobre el sistema (real)	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Establecen sobre el sistema un balance energético neto	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Reconocen el sentido de las transferencias netas de energía sistema-entorno	✖	✖	✖		✖	✖	✖
El sistema pierde energía: exotermia	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Reconocen el sentido de las transferencias energéticas "netas" por calor	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Reconocen, en el cómputo total de energía puesta en juego, los aportes de energía por calor al sistema desde el entorno	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Reconocen, en el cómputo total de energía puesta en juego, la liberación de energía por calor debido al proceso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan alguna clasificación del proceso atendiendo a criterios termodinámicos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Clasifican el proceso de acuerdo con los tipos de interacciones formadas y rotas en el proceso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Clasifican el proceso de acuerdo con la posibilidad de que se produzca o no el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Clasifican el proceso de acuerdo con el resultado del balance energético	✓				✓	✓	
Describen el proceso como exotérmico (balance energético negativo: el sistema libera energía)	✓				✓	✓	

VI.1.1.3. Descripción de resultados de la prueba *Cf03* de caracterización final

Actividad 03: 100% carbono

Se denominan alótropos de un elemento las distintas formas del elemento que difieren en propiedades físicas y químicas.

El elemento carbono nos brinda el ejemplo más famoso de alotropía: el grafito y el diamante son sus dos formas alotrópicas más conocidas (que no las únicas). Es obvio que grafito y diamante tienen propiedades, tanto físicas como químicas, extraordinariamente diferentes. ¡Y su composición química es idéntica: 100% carbono!

Cf_{03}[1]

A. Cita las propiedades físicas y químicas que encuentres diferentes para el caso del grafito y el diamante. ¿A qué se deben estas diferencias?

B. ¿Crees que grafito y diamante tendrán el mismo valor de entropía? Justifica tu respuesta, indicando razonadamente cómo esperas que sea el/los valor(es) de entropía para grafito y diamante.

Los resultados del *item Cf03(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Carlos	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO							
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS							
El diamante tiene menor entropía que el grafito	✓	✓	✓				✓
Ambos materiales tienen entropía diferente					✓		

DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO							
Relaciones macroscópicas							
Reconocen explícitamente los sistemas							
Reconocen implícitamente los sistemas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Comparación de la dureza de ambos materiales	✓	✓		✓			✓
Comparación de la resistencia al rayado	✓	✓	✓				
Comparación de la densidad / grado de compacidad	✓		✓				
Comparación de la ductilidad ¿?							✓
Comparación del color / transparencia							✓
Comparación de la utilidad de ambos materiales							✓
Reconocen que ambos materiales tienen diferentes propiedades, pero no describen ninguna					✓	✓	
Relaciones microscópicas							
Hacen referencia a la composición química: carbono	✓				✓	✓	
Hacen referencia a la posibilidad de transformar grafito en diamante por presurización del material			✓				
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS							
Relaciones macroscópicas							
Las propiedades de los materiales se justifican por la temperatura a la que se forma el material					✓		
La entropía de las sustancias blandas es mayor que la de las sustancias duras		✓					
La entropía de las sustancias más ordenadas es menor que la de las sustancias más desordenadas							✓
Relaciones microscópicas							
Las propiedades (macroscópicas) de los materiales se justifican por la disposición de sus átomos	✓	✓					
Las propiedades de los materiales se justifican por la formación de enlaces					✓		
La distancia interatómica es menor en el diamante que en el grafito	✓						
El grado de simetría es mayor en el diamante	✓						
La entropía es mayor en las sustancias con mayor distancia interatómica	✓						
La entropía es mayor en las sustancias menos simétricas	✓						
La entropía es mayor en las sustancias que presentan sus partículas más desordenadas			✓				
INFERENCIAS Y PREDICCIONES							
De carácter macroscópico							
Justifica las propiedades macroscópicas del material a partir del grado de desorden de las partículas	✓						
Deduce el grado de desorden de las partículas a partir de las propiedades macroscópicas del material				✓			✓
Deduce el valor de la entropía del material a partir de conceptos microscópicos (partículas, enlaces)	✓			✓			✓
Deduce el valor de la entropía del material a partir de conceptos macroscópicos (propiedades observables)		✓					
No justifica el valor de la entropía de ambos materiales					✓		

VI.1.1.4. Descripción de resultados de la prueba *Cf04* de caracterización final

Actividad 04: variaciones de entropía en procesos físicos

Ejemplos muy conocidos de procesos físicos son la fusión de un sólido, la solidificación de un líquido y la disolución de un soluto sólido en un disolvente líquido.

Cf$_{04}$[1]

A. Explica, desde el punto de vista cualitativo, cómo esperas que sea la variación de entropía de estos procesos físicos.

Cf$_{04}$[2]

B. Explica cómo variará la entropía de un cristal perfecto de hielo a una temperatura inicial de 0 K, si lo calentamos, a presión atmosférica, hasta una temperatura final de 423 K. Elabora una gráfica que permita representar claramente tu explicación.

Los resultados del *item Cf04(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
En la fusión de un sólido, $\Delta S > 0$	✓	✓	✓	✓		✓
En la fusión de un sólido, $\Delta S < 0$				✓	✓	
En la solidificación de un líquido, $\Delta S < 0$	✓			✓		✓
En la solidificación de un líquido, $\Delta S > 0$					✓	
En la disolución de un sólido, $\Delta S > 0$	✓			✓		
En la disolución de un sólido, $\Delta S < 0$					✓	
En la disolución de un sólido, $\Delta S_{sólido} > 0$, mientras que $\Delta S_{disolvente} < 0$						✓
En la fusión de un sólido, la entropía del sistema aumenta		✓	✓			
En la solidificación de un líquido, la entropía del sistema disminuye		✓	✓			
En la disolución de un sólido, la entropía del sistema aumenta			✓			
En la disolución de un sólido, la entropía del sistema disminuye		✓				
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Describen explícitamente un sistema objeto de estudio		✓	✓			
Explicitan un estado inicial y un estado final		✓	✓			✓
Describen la progresiva variación de la entropía del sistema entre el estado inicial y el estado final (solamente en el proceso de disolución)		✓	✓			
Relaciona los procesos de fusión de un sólido y solidificación de un líquido						✓
Relaciones microscópicas						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Justifican el signo de $\Delta S_{sistema}$ por comparación explíCitan entre los valores de entropía final e inicial		✓				
Justifican su predicción sobre $\Delta S_{sistema}$ en términos de		✓				✓

mayor o menor orden en el sistema						
Reconocen implícitamente que, al final de un proceso termodinámico, la entropía del sistema alcanza un valor mínimo o máximo		✓	✓			
En los procesos de transición de fase, justifican el signo de $\Delta S_{sistema}$ basándose en el estado de agregación del sistema en los estados inicial y final			✓			✓
Relaciones microscópicas						
Justifican su predicción sobre $\Delta S_{sistema}$ en términos de mayor o menor orden de las partículas del sistema			✓			
En el proceso de disolución, justifican el signo de $\Delta S_{sistema}$ basándose en la interacción de las partículas de soluto con las de disolvente			✓			✓

Los resultados del *item Cf04(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
La entropía del cristal de hielo sometido a las condiciones descritas, aumentará		✓	✓			✓
La entropía del cristal de hielo sometido a las condiciones descritas, disminuirá				✓		✓
La variación de entropía del cristal de hielo sometido a las condiciones descritas, será menor de cero					✓	
Justifica la variación de entropía del cristal		✓			✓	✓
Realiza una representación gráfica para describir la variación de la entropía del cristal	✓		✓			✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Reconoce (implícitamente) un sistema objeto de estudio					✓	✓
Describe que el cristal sufre, durante el proceso termodinámico, algún proceso de transición de fase		✓			✓	
Reconoce el proceso de transición sólido – líquido		✓			✓	
Representa en el eje X la entropía	✓					
Representa en el eje Y la entropía			✓			
Representa en el eje X la temperatura			✓			
Representa en el eje Y la temperatura	✓					✓
La temperatura representada es absoluta	✓		✓			
Indica las unidades de temperatura (K)	✓					
Indica las unidades de entropía						
Indica explícitamente los valores de temperatura inicial y final	✓			✓		
Rotula el origen de coordenadas	✓		✓			
Divide el eje X en intervalos de valores			✓			
Divide el eje Y en intervalos de valores						
La representación gráfica es de trazo continuo	✓		✓			✓
Señala el punto correspondiente al valor $T = 423$ K	✓					
Representa una dependencia exponencial (*pseudo*)exponencial de la entropía frente a la temperatura	✓		✓			
Relaciones microscópicas						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Justifica el aumento de entropía del sistema basándose en procesos de transición de fase		✓				
Justifica la disminución de entropía del sistema basándose en el aumento de la temperatura						✓
Utilizan la simbología ΔS para referirse a la entropía	✓					
Utilizan la simbología t para designar a la temperatura	✓					

absoluta						
Rotula como 0 el origen de coordenadas (0,0)	✓					

VI.1.1.5. Descripción de resultados de la prueba *Cf05* de caracterización final

Actividad 05: un polímero

El hule es un material polimérico, y su estructura le proporciona interesantes propiedades. Por ejemplo, al estirar rápidamente una banda de hule, podemos observar que su temperatura aumenta ligeramente. Y, si soltamos rápidamente una banda de hule estirada, notaremos una ligera disminución de temperatura.

Cf_{05}[1]

A. Si tienes que explicar a alguien, utilizando lo que sabes de Termodinámica Química, estos fenómenos: ¿a qué conceptos y enunciados recurrirías? Justifica tu respuesta.

B. Explica estos dos fenómenos desde el punto de vista termodinámico.

Los resultados del *item Cf05(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
Al estirar la banda de hule, su entropía disminuye	✓	✓	✓			✓
Al estirar la banda de hule, su entropía aumenta	✓		✓	✓		✓
Al soltar la banda de hule, su entropía disminuye		✓				✓
Describe / explica el proceso termodinámico asociado al estiramiento de la banda de hule	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Describe / explica el proceso termodinámico asociado a la liberación de la banda de hule		✓		✓		✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Citan el concepto de entropía						✓
Citan el concepto de entalpía						✓
Citan el concepto de calor	✓					
Citan el concepto de temperatura	✓	✓				
Citan el concepto de trabajo	✓					
Citan el concepto de presión		✓				
Citan el concepto de masa		✓				
Relaciones microscópicas						

Citan el concepto de enlace químico		✓				
Citan el concepto de (des)orden	✓					
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Justifican la utilización de los conceptos que citan porque tienen relación con los procesos que tienen lugar	✓					
Utilizan en su explicación el concepto de sistema					✓	
Utilizan en su explicación el concepto de entropía	✓	✓	✓			✓
Utilizan en su explicación el concepto de rozamiento			✓			
Utilizan en su explicación el concepto de trabajo	✓				✓	✓
Utilizan en su explicación el concepto de fuerza					✓	✓
Utilizan en su explicación el concepto de calor	✓	✓	✓	✓	✓	
Utilizan en su explicación el concepto de temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan en su explicación el concepto de presión	✓	✓				
Utilizan en su explicación el concepto de energía	✓			✓	✓	
Utiliza (implícitamente) la conservación de la energía	✓		✓	✓	✓	
Utiliza (implícitamente) el concepto de energía interna	✓		✓	✓	✓	
Explicitan la realización de un trabajo sobre el sistema (estiramiento de la banda de hule)	✓				✓	
Consideran el trabajo como una fuerza que se aplica sobre el sistema					✓	✓
Apelan a un aumento en la energía del sistema como consecuencia de la realización de un trabajo sobre el sistema (estiramiento de la banda de hule)					✓	✓
Relacionan el estiramiento de la banda de hule con el estiramiento de los enlaces del sistema		✓				
Apelan a un aumento en la energía del sistema como consecuencia del estiramiento de la banda de hule	✓			✓		
Justifica el (des)ordenamiento de las partículas a partir de la variación de la entropía			✓			✓
Identifica el (des)ordenamiento de las partículas con la variación de la entropía	✓					✓
Relaciona el trabajo realizado (sobre el sistema y por el sistema) con la variación de la entropía del sistema	✓	✓				✓
Identifica la distancia de enlace con la variación de la entropía	✓			✓		
Justifica que la entropía del sistema aumente al estirar la banda de hule, basándose en que se producen choques entre las partículas del sistema			✓			
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe a un proceso de calor	✓		✓		✓	
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe a un aumento en las distancias de enlace		✓				
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe al proceso de calor generado por el rozamiento entre las partículas			✓			
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe al proceso de calor generado por el aumento de energía en el sistema			✓		✓	
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe a una gran liberación de la energía que se ha aportado al sistema	✓		✓	✓	✓	✓
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe al trabajo que se ha aportado al sistema					✓	✓
Explicita la existencia de una relación entre la entalpía y la temperatura						✓
Explicita la existencia de una relación entre la entropía y la temperatura						✓
El aumento de presión que se produce al estirar la banda de hule, se debe al estiramiento del los enlaces químicos del sistema		✓				
La disminución de temperatura que se produce cuando se suelta la banda de hule, se debe a la disminución de la presión relacionada con una disminución en las distancias de enlace		✓				
La disminución de temperatura que se produce al soltar la banda de hule, se debe que anteriormente se produjo una gran liberación de la energía previamente aportada al sistema				✓		
Asocia la disminución de temperatura que se produce al soltar la banda de hule, con la realización de trabajo que "se va" del sistema						✓
Relaciones microscópicas						
Utilizan en su explicación el concepto de partícula			✓			
Utilizan en su explicación el concepto de enlace químico		✓				

Utilizan en su explicación el concepto de choque entre partículas			✓			
Utilizan en su explicación el concepto de (des)orden	✓		✓			✓

VI.1.1.6. Descripción de resultados de la prueba *Cf06* de caracterización final

Actividad 06: azufre en los volcanes

En las zonas volcánicas se observa con gran frecuencia la deposición de azufre sólido en las áreas cercanas al volcán. Estas deposiciones se consideran causadas por la reacción del sulfuro de hidrógeno con el dióxido de azufre que es expulsado por el volcán:

$$2\ H_2S_{(g)} + SO_{2\ (g)} \rightarrow 3\ S_{(s)} + 2\ H_2O_{(g)}$$

Cf06[1]

A. Con ayuda de los datos termodinámicos tabulados, ¿puedes predecir si la reacción entre el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de azufre es más o menos eficaz en condiciones de altas temperaturas?

Cf06[2]

B. El carbón que emplean como combustible las centrales térmicas contiene por lo general importantes concentraciones de azufre. La combustión de este carbón rico en azufre es la responsable de que las centrales térmicas emitan grandes cantidades de SO_2, uno de los contaminantes responsables de la "lluvia ácida".

¿Cómo puede la Termodinámica ayudarte a elegir algún método para la eliminación de la "lluvia ácida" o la minimización de sus consecuencias?

Los resultados del *item Cf06(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO					
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS					
A altas temperaturas, la reacción será más eficaz	✓	✓			✓
A altas temperaturas, la reacción será más eficaz			✓		
Justifica su respuesta en los resultados de sus cálculos	✓		✓		✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO					
Relaciones macroscópicas / Estrategias de cálculo					
Calcula la ΔH y la ΔS asociada a la reacción a partir de los datos recogidos en las tablas termodinámicas			✓		✓
Considera T como incógnita de la ecuación Fundamental de la Termodinámica			✓		✓
Evalúa en qué rangos de T es positivo, y en cuáles negativo, el signo de ΔG para la reacción			✓		

Utiliza los datos de ΔG de las tablas termodinámicas para calcular ΔG	✓				
Calcula el valor de T para el cual se anula la ΔG de la reacción	✓				
Relaciones macroscópicas / Estrategias de cálculo					
Escribe la reacción entre el $H_2S_{(g)}$ y el $SO_{2\ (g)}$	✓				
Ajusta la reacción	✓				
Recoge los datos termodinámicos en una tabla	✓			✓	
Transcribe adecuadamente los datos termodinámicos					✓
Explicita formalmente las ecuaciones de ΔH y ΔS					
Escribe la Ecuación Fundamental de la Termodinámica	✓		✓	✓	✓
Realiza las operaciones algebraicas adecuadamente	✓		✓		✓
Desglosa y simboliza los pasos de las operaciones algebraicas que realiza	✓		✓		
Expresa los datos de ΔH y ΔS de la reacción con unidades	✓				✓
Expresa los datos de ΔH y ΔS de la reacción con unidades adecuadas: kJ y kJ/K, respectivamente					
Expresa los datos de ΔH y ΔS de la reacción con unidades no adecuadas: kJ/mol y kJ/mol·K, respectivamente	✓				✓
Utilizan el símbolo º para indicar que los datos de ΔH, ΔS y ΔG son normales	✓			✓	
Utiliza el término ΔS para referirse a los datos de S	✓			✓	
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS					
Relaciones macroscópicas					
Una reacción es más eficaz cuanto más espontánea sea	✓				✓

Los resultados del *item Cf06(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Adela	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO			
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS			
Propone métodos para reducir o eliminar in situ la cantidad de SO_2 emitido	✓		✓
Propone métodos para reducir o eliminar el contenido en azufre del carbón		✓	
Hace referencia a métodos para reducir o eliminar in situ la cantidad de SO_2 emitido	✓		
Hace referencia a métodos para reducir o eliminar el contenido en azufre del carbón	✓		
Propone buscar combustibles alternativos al carbón		✓	
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO			
Relaciones macroscópicas			
El combustible alternativo al carbón ha de ser poco contaminante		✓	
La combustión del combustible alternativo al carbón debe ser exotérmica (liberar energía)		✓	
La ΔS asociada a la combustión del combustible alternativo al carbón debe ser negativa		✓	
La ΔG de la combustión del combustible alternativo al carbón debe ser positiva a altas temperaturas (proceso no espontáneo)		✓	
Relaciones microscópicas			
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS			
Relaciones macroscópicas			
Relaciona las variables termodinámicas con las reacciones químicas propuestas			
Relaciona los métodos propuestos / citados con los cálculos termodinámicos		✓	✓

Hace referencia implícita a reacciones químicas (espontáneas) para eliminar sustancias contaminantes	✓		
Hace referencia a la influencia de la temperatura en la posibilidad de que una reacción química tenga lugar	✓	✓	
Hace referencia a la naturaleza química de las sustancias implicadas en los métodos propuestos / citados		✓	

VI.1.1.7. Descripción de resultados de la prueba *Cf07* de caracterización final

Actividad 07: ¿agua?

En condiciones de temperatura ambiente (25 °C) y presión atmosférica (1 atm), la reacción de formación del agua líquida a partir de sus elementos presenta una variación de entalpía de −68,3 kcal/mol y una variación de energía de Gibbs de −236,25 kJ/mol.

Cf_{07}[1]

A. ¿Tiene lugar esta reacción a temperatura ambiente? Justifica tu respuesta.

B. ¿Qué otras conclusiones puedes extraer sobre este proceso a través de conceptos y enunciados relacionados con la Termodinámica Química?

Los resultados del *item Cf07(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO							
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS							
La reacción descrita no tiene lugar a temperatura ambiente	✓	✓		✓	✓		✓
La reacción tiene lugar a temperatura ambiente			✓		✓	✓	
Es posible que la reacción tenga lugar a temperatura ambiente		✓					
La reacción descrita tiene lugar a altas temperaturas	✓				✓		
Consideran que la reacción es espontánea	✓			✓		✓	✓
Consideran que la reacción es no espontánea a bajas temperaturas					✓		
Consideran que la reacción es espontánea a altas temperaturas					✓		
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO	✓	✓					✓
Relaciones macroscópicas	✓	✓		✓			
Escribe la ecuación correspondiente a la reacción	✓			✓			
Escribe el factor de conversión caloría → Julio	✓				✓		✓
Convierte a unidades de kJ/mol la ΔH asociada a la reacción				✓	✓		✓
Interpreta mal el valor de ΔG				✓			✓
Deciden la espontaneidad de la reacción utilizando como criterio el signo de la ΔG de la reacción	✓	✓		✓	✓	✓	
Explicitan que el signo de la ΔG de la reacción es un indicadore de la espontaneidad de la reacción				✓			
Deciden la espontaneidad de la reacción aplicando los distintos casos de la tabla de términos				✓	✓		✓
Deciden la espontaneidad de la reacción utilizando como			✓				

criterio el signo de la ΔH de la reacción							
Calcula la ΔS asociada a la reacción					✓		✓
Utiliza en los cálculos la temperatura en grados Celsius	✓				✓	✓	✓
Expresan el valor de ΔS acompañado de las unidades adecuadas (SI)				✓	✓		
No extraen ninguna conclusión no relacionada con la espontaneidad	✓	✓	✓	✓		✓	
Explicita que el proceso es exotérmico					✓		
Cita la exotermia/endotermia del proceso, sin definirla					✓		✓
El proceso presenta poco desorden					✓		
Relaciona el "grado de desorden del proceso" con la ΔS del mismo					✓		
Relaciones microscópicas							
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS							
Relaciones macroscópicas							
No justifican por qué la reacción no tiene lugar a *T* ambiente	✓	✓			✓		
Es posible que realicen la afirmación basándose en que la reacción no es observable	✓	✓	✓		✓		
Para que la reacción tenga lugar, ha de aportarse energía al sistema	✓						
Al aportar energía al sistema, la temperatura de éste aumenta	✓						
La reacción es espontánea a altas temperaturas porque sólo en estas condiciones el sistema tiene la energía suficiente como para comenzar la reacción	✓						
El hecho de que la reacción sea espontánea no implica que tenga lugar temperatura ambiente	✓	✓		✓			
La reacción puede tener lugar a temperatura ambiente porque es espontánea		✓		✓			
La reacción es espontánea porque desprende energía			✓				
La reacción tendrá lugar si cumplena las condiciones necesarias para que suceda				✓			
La reacción tiene lugar porque es espontánea						✓	

Análisis mediante esquemas de conocimiento (pág. 1083). Se detalla el análisis de los esquemas de razonamiento y de los esquemas de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Análogamente a lo desarrollado en anteriores capítulos, se ejemplifican los esquemas de razonamiento y acción más relevantes.

Análisis mediante competencias (pág. 1126). Se realiza el análisis de las competencias que demostraron los estudiantes en la resolución de las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas de la caracterización final. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas por los estudiantes en sus respuestas a las pruebas de la batería ***Cf***.

Contraste de la *sHT3*$_{.1}$ (pág. 1132). Se establecen las conclusiones derivadas del análisis discutido en el capítulo, análisis que ha permitido la verificación o refutación de la *Subhipótesis de trabajo 3.1* (*sHT*$_{3.1}$).

VI.2. Planteamiento y fundamentación de la $sHT_{3.1}$

Con el propósito de determinar los conocimientos finales del alumnado, se diseñó una batería de caracterización final de la muestra compuesta por siete pruebas mediante las que se exploró hasta qué punto los alumnos habían construido, a lo largo de la intervención, ciertas concepciones y destrezas que son capaces de transferir de manera autónoma (sin ayuda de un experto o de sus compañeros) a corto plazo. Más adelante, en el ***Capítulo VII*** se analiza hasta qué punto los alumnos seguían siendo capaces, dos meses después de la caracterización final, de seguir demostrando sus conocimientos conceptuales y procedimentales para dar respuesta a cuestiones de base termodinámica.

En resumen, los resultados del análisis de las respuestas que elaboraron los estudiantes para resolver las cuestiones planteadas en las pruebas finales, permiten determinar los conocimientos que tenía cada individuo inmediatamente después de la aplicación de la segunda propuesta de enseñanza, y por ello sirven para contrastar la *subhipótesis de trabajo 3.1 ($sHT_{3.1}$)*, que se formuló en el ***Capítulo I*** (***Volumen A***) y es la primera subhipótesis en la que se operativizó la tercera hipótesis de trabajo, dada la amplitud y la diferente condición de los resultados que permiten contrastarla:

> Después de la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes activan esquemas de razonamiento ***—Sistemas termodinámicos (ER1), Procesos termodinámicos (ER2), Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3), Dinámica de los procesos químicos (ER4) y Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos (ER5)—*** y esquemas de acción ***— Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos (EA1), Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2), Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3) y Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química (EA4)—*** acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.
>
> Tras la aplicación de la segunda propuesta en el aula, se verifican progresos significativos en los esquemas de razonamiento y acción y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación anterior a la aplicación de la segunda propuesta didáctica.

La $sHT_{3.1}$ hace referencia a las condiciones finales del conocimiento de los estudiantes una vez se ha terminado el periodo de aplicación de la metodología ensayada. Considerando que la producción oral y escrita del alumnado revela la incorporación de las relaciones establecidas a lo largo de la intervención y, por tanto, pone de manifiesto la implicación de cada individuo en la evolución de su propio conocimiento, para contrastar la $sHT_{3.1}$ se determinó el conocimiento que

demostraron los alumnos en sus respuestas a las siete pruebas que constituyen la batería de caracterización final de la muestra. La determinación del conocimiento se realiza mediante los dos métodos de análisis cualitativo cuyos fundamentos se describen en el ***Volumen A***: los esquemas de razonamiento y de acción, y las competencias.

Los enunciados operativos que se derivan de la $sHT_{3.1}$ y se utilizan para ponerla a prueba están relacionados con los que se aplicaron en el ***Capítulo V***:

- En el momento de aplicación de la batería de caracterización final de la muestra, inmediatamente después de la implementación de la unidad didáctica *Termodinámica Química*, se espera que los alumnos:
  - hayan construido el significado de la espontaneidad de reacción en relación con el sentido de evolución de los sistemas químicos;
  - justifiquen la utilidad de la función de estado entropía para el estudio de la evolución de los sistemas químicos;
  - den significado macroscópico y microscópico al concepto de entropía;
  - interpreten los principios segundo y tercero de la Termodinámica;
  - comprendan el concepto de energía de Gibbs como función de estado extensiva que proporciona una condición de espontaneidad y equilibrio para los sistemas;
  - relacionen la variación de la energía de Gibbs con el trabajo útil y con las variaciones de las funciones de estado entalpía y entropía;
  - reconozcan los criterios de espontaneidad de reacción referidos al universo (variación de la entropía del universo) y al sistema (variación de energía de Gibbs del sistema); y
  - hallan desarrollado estrategias para obtener información sobre la espontaneidad de las reacciones químicas, interpretando datos termodinámicos de acuerdo con razonamientos fundamentados en los conceptos y los principios termodinámicos.
- La realización de las actividades de *Termodinámica Química* ha ayudado a los alumnos a mejorar significativamente sus conocimientos, en términos de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias científicas, con respecto a los conocimientos que habían demostrado en las pruebas de caracterización inicial de la muestra (***Capítulo IV***).

Antes de describir e interpretar en profundidad los resultados correspondientes a la caracterización final de la muestra, se detallan las pautas que se siguieron en su aplicación y desarrollo.

VI.3. Aplicación y desarrollo de la batería final de pruebas (caracterización final *Cf*)

En este epígrafe se exponen las principales observaciones sobre las incidencias que se produjeron en el aula durante la implementación de batería de caracterización final de la muestra, y las observaciones más destacadas sobre la repercusión de los aspectos metodológicos en la aplicación de las pruebas.

La caracterización final tuvo lugar a finales de marzo de 2009, inmediatamente después de terminar la implementación de la segunda unidad didáctica ensayada. Recuérdese que hacia el final de ésta los conflictos actitudinales habían evolucionado de tal manera que algunos alumnos (Diana, Brais e Carlos) se ausentaban con frecuencia a las sesiones de Química (y de otras materias); a estas inasistencias se sumaba la de Berta, que se había visto obligada a abandonar temporalmente las clases para salvar la granja familiar de la ruina en la que la había dejado el huracán que se había producido a comienzos de la fase experimental.

Como Rodrigo no lograba cambios apreciables de actitud censurando a los alumnos su conducta poco responsable, y como los comportamientos de indiferencia y pereza por parte de Brais, Carlos y Diana se repetían una y otra vez, al final el profesor optó por echar mano al aguijón de la demanda académica y, sobre la marcha de la intervención, añadió una componente de calificación negativa a aquéllos que no cumplían con las tareas. Como la influencia de esta apelación a la demanda académica no tuvo más que una repercusión fugaz, Rodrigo decidió pasar a la acción y anunciar que la caracterización final, que al fin y al cabo era una prueba escrita, contaría en la calificación del trimestre. Pero al mismo tiempo se sentía un poco inseguro de la eficacia de su medida "de urgencia": si ésta no funcionaba, no se habría logrado paliar los efectos negativos de los comportamientos de estos alumnos en el aprendizaje; y si se lograba que la calificación de las pruebas de caracterización final "les ayudara a estudiar", entonces podía caerse en el riesgo de desvirtuar con la demanda académica el propósito de construir un conocimiento científico que resultara significativo para algo más que aprobar exámenes.

En todo caso, Rodrigo estaba dispuesto a exprimir la demanda académica, y para lograrlo sin promocionar las metodologías tradicionales decidió que no se realizaría inmediatamente un "examen de evaluación" sobre Termodinámica Química, y que la parte de la calificación que en teoría correspondía a éste, se iba a obtener a partir de los resultados que demostraran los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización final. Casi una semana antes de la implementación de la batería de pruebas, los estudiantes ya estaban prevenidos de la intención del profesor, y no parecían oponerse a ella. Así, a diferencia de lo que se temía Rodrigo al principio de la fase experimental, la ausencia de un examen tradicional no generó malestar en el grupo de clase; aunque quizá los alumnos no percibieran una

auténtica ausencia de "examen", porque no se eliminó la posibilidad de una calificación de pruebas escritas, sino que sustituyó un examen tradicional por una batería de preguntas de otro estilo. Los estudiantes seguían prefiriendo que la calificación se basara en la respuesta a preguntas cerradas y ejercicios mecánicos que fueran fáciles de resolver mediante la memorización de contenidos conceptuales, pero a aquellas alturas de la intervención llevaban un mes trabajando con la nueva metodología, y se habían habituado al tipo de cuestiones planteadas en las pruebas de caracterización. Como además habían comprobado que las actividades de las secuencias didácticas ensayadas y las pruebas de las baterías de caracterización incluían preguntas que requerían el desarrollo de cálculos y por lo tanto eran útiles en el *adiestramiento* para las PAAU, no les infundía inseguridad que la calificación estuviera basada en las respuestas a una serie de cuestiones como las que se habían trabajado las últimas semanas.

Desde el punto de vista de la investigación, consideramos que el hecho de utilizar la demanda académica no interfirió de manera perjudicial en los resultados de aprendizaje. Toda decisión que se tome en cuanto a las calificaciones de un trimestre es susceptible de influir en el desempeño del alumnado, pero precisamente en el caso de esta muestra, con Brais, Carlos, Berta y Diana mostrando su apatía con mayor o menor disimulo y con Débora desaparecida del aula, la cierta presión que generó la decisión del profesor favoreció el posicionamiento activo de los estudiantes: era hora de que exteriorizaran abiertamente qué esfuerzo estaban dispuestos a hacer para sacar adelante el segundo trimestre de la materia. Si finalmente decidían abandonar el estudio de la materia o postergarlo hasta septiembre, el de la caracterización final era un buen momento para que lo demostraran abiertamente.

Desde el principio de la fase experimental, los alumnos ya sabían que las pruebas de caracterización se utilizarían para evaluar sus ideas en momentos clave. Hasta el momento de la implementación de ***Cf***, todos los esfuerzos del profesor (y de la investigadora) se habían dirigido a no agobiar a los estudiantes ante la idea de enfrentarse a más *exámenes* de los habituales; pero, de seguir con esta estrategia, se corría el riesgo de que los alumnos que habían manifestado disgusto por verse obligados a "atender y trabajar en clase" (en palabras de Rodrigo) se empeñaran en demostrar que no pensaban responder con seriedad a las pruebas, como había sucedido con Carlos y Berta en ***Ci*** (ver ***Volumen B1***). Para no se repitiera la escena de que algunos se negaran a entregar los guiones de trabajo, la implementación de las pruebas de caracterización final de la muestra ocupó una única sesión del horario lectivo de la materia de Química, con 50 minutos para responder a las siete pruebas planteadas. Dado que esa sesión tuvo lugar en viernes a primera hora de la mañana (de 8.30 a 9.20), se pidió a los alumnos que fueran puntuales, y Rodrigo propuso abrir el laboratorio diez minutos antes de las 8.30, para disponer de más tiempo.

La caracterización final se realizó en el laboratorio de Química, y los alumnos se sentaron en las mesas en el orden en el que disponían en las sesiones de clase. Con la finalidad de reforzar la idea de que las baterías de pruebas eran simulacros de control escrito, el desarrollo de las caracterizaciones no se grabó en audio y vídeo, y el procedimiento para recabar los datos consistió en la recogida y revisión de los materiales escritos que produjeron por los alumnos como respuesta a las siete pruebas de la batería que se describen en el apartado siguiente, y en la toma de notas de campo por parte de la investigadora, que estuvo presente en todo momento como observadora independiente. Al igual que en las demás pruebas de caracterización, se pidió a los estudiantes que respondieran a las cuestiones de manera individual, aunque no se les prohibió expresamente que intercambiaran impresiones. La investigadora tomó nota de las interacciones que se produjeron entre ellos, y con el profesor, que no tuvo que solucionar dudas sobre los enunciados de las preguntas planteadas.

En cuanto a las incidencias que afectaron al desarrollo de las pruebas en el aula, solamente cabe destacar dos:

Como ya se ha comentado en el ***Capítulo V***, el día anterior a la realización de ***Cf***, los alumnos se habían puesto de acuerdo para preguntar si se podía retrasar la implementación de las pruebas, de manera que ésta tuviera lugar después del fin de semana. Enfadado, Rodrigo les había respondido que en la vida no se puede retrasar toda obligación de manera sistemática, y que cualquier compromiso debe ser respondido en lo posible, salvo cuestión de fuerza mayor. Ni una cita en una consulta médica, ni un plazo fijado por organismos oficiales, como Hacienda o la administración de un ayuntamiento, pueden aplazarse "porque sí", y aunque en el Instituto a veces se cediera a una petición de cambio si dos exámenes de distintas materias quedaban demasiado juntos en el tiempo, los alumnos no podían exigir a los profesores una y otra vez que cambiaran de día los exámenes por el simple motivo de que "uno no se lo haya currao antes". Afirmó, además, que para responder a las siete preguntas de la batería de pruebas tendrían alrededor de una hora, porque como máximo sólo se podrían aprovechar cinco o diez minutos de la clase de las 9.20 h. Ante la contundencia de la respuesta del profesor, los estudiantes no insistieron en cambiar la fecha de la caracterización final.

El viernes, los diez alumnos (todos menos Débora) llegaron a las 8.30 h, y Rodrigo confió en un aparte a la investigadora que aquella puntualidad era "un buen augurio". Los alumnos se sentaron en sus mesas de trabajo, por las que ya se habían repartido los guiones de trabajo, y se pusieron a trabajar. Berta y Diana se limitaron a leer las cuestiones con rapidez (Diana abría los ojos y enarcaba las cejas, en un gesto que pretendía ser de asombro ante textos ininteligibles), y a los cinco minutos de empezar la clase, ambas se miraron y se levantaron al unísono, guion de trabajo en mano y decididas a entregar las pruebas y marcharse. Rodrigo les recogió

los guiones de trabajo y les recordó que, como en cualquier otro examen, no podían irse hasta que sonara el timbre de inicio de la siguiente clase. Berta y Diana se encogieron de hombros y se sentaron, y cuando el profesor les sugirió que repasaran lo que quisieran sobre Química o cualquier otra materia, o que aprovecharan para leer los libros prescriptivos de las materias de Letras, ambas estudiantes se limitaron a torcer el gesto y cruzar los brazos sobre la mesa. Rodrigo se acercó a la investigadora y le mostró los guiones de trabajo, mientras le comentaba en voz baja: "¡Y entregan en blanco!" En su opinión, no había nada que hacer ante aquellas muestras de apatía y desdén, pero él se mantenía en sus trece: "no dejarlos salir antes de que termine el examen, porque si no ya tienen un aliciente para entregar así [los guiones de trabajo en blanco]".

Pocos minutos después, Brais e Carlos también entregaron sus guiones de trabajo, y al volver a sus respectivas mesas hicieron un gesto de complicidad a Diana Al sentarse, Brais lanzó una significativa mirada a Berta y musitó algo, que parecía un comentario sobre la cantidad de minutos que tendrían para quedarse allí sentados aburriéndose. "Y les cabrea, no te lo pierdas", comentó en voz baja Rodrigo a la investigadora.

Los demás alumnos aprovecharon todo el tiempo disponible para responder a las cuestiones planteadas, y Ana y Adela pidieron permiso al profesor para quedarse unos cinco minutos después de las 9.20 h.

Como en la batería de caracterización inicial, el diseño de la batería de caracterización final tuvo en cuenta la necesidad de presentar distintos contextos y situaciones para que los alumnos pongan de manifiesto sus esquemas de razonamiento y acción. Se diseñaron siete pruebas de manera que incluyeran tareas de los siguientes perfiles:

Cinco de las cuestiones son de tipo cualitativo, e inciden más en los aspectos interpretativos que en los descriptivos. En *Cf01*, *Cf02* y *Cf04*, se pide al alumnado que interprete distintos aspectos termodinámicos de los cambios de estado del agua, sin que tengan que realizar ningún tipo de cálculo matemático. La razón de proponer estos procesos físicos es la misma que determinó la elección de las reacciones químicas de ***Ci***: los estudiantes de la muestra tenían pocos conocimientos sobre los cambios físicos y químicos. En consecuencia, era necesario regular la dificultad las pruebas de manera que generaran respuestas en las que se revelaran los conocimientos conceptuales y procedimentales sobre Termodinámica Química, sin que una comprensión débil del sistema o proceso propuesto eclipsara la activación de esquemas de razonamiento y de acción sobre los aspectos energéticos de los cambios que experimenta la materia. Se trataba de evitar que la batería de pruebas al completo arrojara resultados pobres o confusos como los de la prueba *Ci02* (ver ***Volumen B1***), y para ello había que seleccionar sistemas y procesos conocidos por los alumnos. Al disponer de siete pruebas de caracterización y por lo

tanto siete ejes temáticos posibles, se consideró interesante dedicar una de las cuestiones para indagar hasta qué punto los estudiantes habían desarrollado la capacidad de transferencia de conocimientos; en este sentido, una de las pruebas debía presentar un proceso físico o químico menos significativo para el alumnado. Con este propósito se seleccionó *Cf05*, prueba que plantea una cuestión que Johnstone *et al.* (1977) habían pasado a una muestra de alumnos de la misma edad que los del grupo analizado en esta investigación. Las demás pruebas se diseñaron de manera que se adecuaran a los conocimientos finales del alumnado, de acuerdo con los contenidos conceptuales y procedimentales trabajados y con las impresiones de Rodrigo sobre la dificultad que ofrecerían las cuestiones a los estudiantes, teniendo en cuenta los resultados preliminares del aprendizaje realizado a lo largo de la unidad didáctica *Termodinámica Química*.

La dificultad de las tres pruebas acerca del agua se ha escalonado de manera que la primera (*Cf01*) ayude a explicitar modelos de partículas y enlace para justificar cómo será la variación de entropía predicha para los distintos cambios de estado del agua; en la segunda prueba (*Cf02*) se añade una predicción sobre la variación de entalpía de los cambios de estado, y se pide a los estudiantes que analicen la espontaneidad de los mismos, teniendo en cuenta qué factores influyen en ella. Una vez que han trabajado con estas ideas, *Cf03* cambia de sistema para comprobar hasta qué punto los alumnos comprenden el concepto de función de estado y lo aplican a la entropía para justificar las propiedades de dos sustancias puras de igual composición y distintas estructura química (grafito y diamante), y para verificar si han interiorizado la noción de cero absoluto de temperatura. Después de este momentáneo cambio de sistema, en *Cf04* se vuelve a plantear una cuestión sobre el agua, y se les propone la elaboración de una representación gráfica de entropía frente a temperatura.

Después de *Cf05*, vienen las dos pruebas mediante las que se espera que los alumnos demuestren sus conocimientos procedimentales en la manipulación de datos termodinámicos y la obtención de resultados, y los conocimientos conceptuales en la elaboración de razonamientos que se retroalimenten con las acciones realizadas, traduciendo del lenguaje matemático la información termodinámica sobre los procesos planteados, y llegando a conclusiones científicamente fundamentadas. Para lograr este propósito, se recurrió a dos reacciones químicas, una *a priori* no conocida por los estudiantes, y otra, conocida:

En *Cf06* se pregunta por las condiciones en las que tendrá lugar una de las reacciones por la que se producen las deposiciones de azufre en las laderas de los volcanes. Con esta cuestión se pretende que los alumnos hagan útiles sus conocimientos de Termodinámica para relacionar las observaciones empíricas (buena parte del azufre emitido por los volcanes como H_2S y SO_2 termina acumulándose como azufre nativo en las laderas, una vez que la temperatura ha

bajado lo suficiente como para que tenga lugar la reacción entre ambos gases) con los cálculos sobre las variaciones de las variables del sistema: dado que se trata de una reacción en la que el sistema experimenta una reorganización energética de manera que tiende a emitir una gran cantidad de energía por calor (proceso exotérmico) y reordenar sus niveles energéticos microscópicos, se ve termodinámicamente favorecida a bajas temperaturas, en las cuales las moléculas ven disminuidos los modos de energía y el entorno absorbe y dispersa una gran cantidad de energía por calor. Inmediatamente después, en el *item Cf06(2)*, se pide a los alumnos que transfieran los conocimientos que han puesto en juego en la resolución de la cuestión anterior para dar respuesta a una pregunta relacionada con la lluvia ácida: uno de los métodos químicos posibles para retirar SO_2 de la atmósfera consiste precisamente en favorecer esta reacción, bajando la temperatura y ajustando las proporciones de reactivos en aquellos lugares en los que se produzcan grandes emisiones de gases sulfurados.

Para terminar la batería de caracterización final, se recurre a la reacción de formación del agua líquida a partir de sus elementos, proceso químico con el que los alumnos ya habían trabajaron en las pruebas de caracterización inicial. Se eligió esta reacción porque había transcurrido un cierto tiempo desde entonces, suficiente como para que la memoria a corto plazo no tuviera efectos inmediatos sobre las respuestas, pero que tampoco se hubiera producido un olvido que impidiera reconocer la reacción química planteada.

Las preguntas de esta prueba están planteadas de tal manera que se puedan responder sin necesidad de utilizar datos termodinámicos tabulados, porque los dos datos estrictamente necesarios ya se aportan en el enunciado. Con esta disposición de información se pretende comprobar hasta qué punto los alumnos recurren a la consulta de más datos de los que se requieren para resolver una cuestión problemática, por el mero hecho de que estén acostumbrados a realizar una serie de cálculos en un orden determinado. Además, se les pregunta implícitamente por las implicaciones termodinámicas y cinéticas de la espontaneidad, y explícitamente por la utilidad de los conceptos y enunciados de la Termodinámica en la obtención de resultados y conclusiones científicas sobre los procesos físicos y químicos.

La elección de estas pruebas de caracterización final obedece a la necesidad de indagar en los conocimientos de los alumnos en Termodinámica Química, dejando de lado aquella parte de los conocimientos sobre Termoquímica que se consideran lo suficientemente consolidados como para que no haya que verificarlos a cada paso, porque se pueden considerar activados desde el momento en que se ponen en juego los conocimientos sobre Termodinámica Química. Así pues, aunque en los esquemas del alumnado no se den por activadas estas relaciones, los resultados del análisis permiten estimar hasta qué punto las ha interiorizado cada individuo, teniendo en cuenta el conjunto de las respuestas elaboradas.

VI.4. Análisis y discusión de los resultados

La relación entre los conocimientos finales del alumnado y los conocimientos deseables de la ciencia escolar se determinó mediante una batería de caracterización final de la muestra constituida por una serie de pruebas sobre el tema objeto de estudio: la Termodinámica Química.

En este apartado se describen y analizan los resultados que se obtuvieron en la caracterización final de la muestra, al aplicar dos tipos de análisis cualitativo, a cada uno de los cuales se dedica un apartado independiente: un *Análisis mediante esquemas de conocimiento* (pág. 1097) y un *Análisis mediante competencias* (pág. 1126).

El primero consistió en la determinación de los esquemas de conocimiento (razonamiento y acción) que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales en las siete pruebas de caracterización final ***Cf***, y el segundo es un análisis de las competencias que demostraron los alumnos al resolver las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas. Tanto los esquemas de conocimiento como las competencias se reconstruyeron a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas por los estudiantes en sus respuestas, y estos razonamientos y estrategias se extrajeron directamente de las manifestaciones escritas que se volcaron en un análisis previo al que hemos denominado *Análisis item a item* (a continuación).

VI.4.1. Análisis *item* a *item*

En este apartado se describen los razonamientos justificativos y las estrategias de acción que utilizaron los alumnos en sus respuestas a cada una de las pruebas de caracterización final *Cf01*,…,*Cf07*, y se analizan las manifestaciones escritas más representativas.

Los enunciados de las pruebas se representan en el tipo de letra `Courier New`, y las manifestaciones escritas se transcriben en Comic Sans.

Una vez que se vaciaron las respuestas escritas de los estudiantes y se las organizó en las categorías que se describen en el ***Volumen A***, se obtuvieron los resultados del análisis *item* a *item* para las pruebas de caracterización final de la muestra, que son los siguientes:

VI.4.1.1. Descripción de resultados de la prueba *Cf01* de caracterización final

Actividad 01: las variaciones de entropía en los cambios de estado del agua

Completa la siguiente tabla, referida a los distintos procesos de cambio de estado del agua.

En las celdas de "estado de agregación inicial" y "estado de agregación final", dibuja esquemáticamente cómo consideras que se encuentran las partículas en el estado físico correspondiente.

En las celdas de S_i, S_f y ΔS, anota cómo crees que serán los valores correspondientes en cada caso (mayores, iguales o menores que cero, grandes o pequeños en valor absoluto...)

CAMBIO DE ESTADO	**ESTADO DE AGREGACIÓN INICIAL**	**ESTADO DE AGREGACIÓN FINAL**	**ENTROPÍA INICIAL (S_i)**	**ENTROPÍA FINAL (S_f)**	**VARIACIÓN DE ENTROPÍA (ΔS)**
Ebullición	---------	---------	---------	---------	---------
Fusión	---------	---------	---------	---------	---------
Solidificación	---------	---------	---------	---------	---------
Condensación	---------	---------	---------	---------	---------
Sublimación s → g	---------	---------	---------	---------	---------
Sublimación g → s	---------	---------	---------	---------	---------

Cf_{01}[1]

A. Elige un proceso de cambio de estado de entre los arriba descritos. Para este proceso, describe las diferencias que encuentras entre los estados inicial y final del sistema.

B. ¿Encuentras alguna relación entre la variación de entropía del sistema y las diferencias que has descrito? Justifica a qué se debe que exista / no exista tal relación.

Los resultados del *item Cf01(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	**Ana**	**Alfonso**	**Benito**	**Carlos**	**Adela**	**Clara**	**Darío**
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS							

La entropía *S* del sistema varía, durante las transiciones de fase, tal que su valor aumenta cuando el sistema evoluciona a una fase más condensada, y disminuye cuando el sistema pasa a una fase más fluida						✓	✓
El valor de la entropía *S* del sistema no varía durante las transiciones de fase	✓	✓	✓				✓
La entropía *S* del sistema varía durante las transiciones de fase, tal que su valor disminuye cuando el sistema evoluciona a una fase más condensada, y aumenta cuando el sistema pasa a una fase más fluida					✓		
RAZONAMIENTO JUSTIFICATIVO							
Relaciones termodinámicas							
La entropía *S* es función de estado (define el estado del sistema)	✗	✗	✗	✓	✗		✗
La entropía *S* es función de estado para los estados sólido y gas: problemas con el estado líquido	✓	✓	✓	✓			✓
No presentan confusiones con los cambios de fase		✓	✓	✓			✓
Adjudicación, para cada cambio de fase, de un valor de entropía positivo para el estado de agregación más ordenado, en contraposición al más desordenado, al cual adjudican un valor de entropía negativo	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Relaciones interpretativas - microscópicas							
Al cambiar el estado de agregación, no varía el tamaño de las partículas					✗	✓	✓
Al cambiar el estado de agregación, varía la distancia entre partículas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Al cambiar el estado de agregación, se ven afectadas las interacciones entre partículas	✓	✓		✓		✓	✓
LENGUAJE UTILIZADO	✓	✓	✓				
Lenguaje científico – escolar	✓		✓				
Utilización adecuada de S y ΔS						✗	✓
Lenguaje cotidiano					✓	✓	
"Interacción" como movimiento						✓	
"dispersión" como distancia entre partículas					✓		
SIMBOLOGÍA UTILIZADA							
Simbología científica – escolar							
Notación para la atribución de *S* al estado del sistema, inicial (S_i) o final (S_f)						✗	✗
Simbología no científica – escolar							
Simbología > (mayor que) y < (menor que) adjudicados en comparación con situaciones diferentes a la dada							✓
Confusión entre S y ΔS						✓	

VI.4.1.2. Descripción de resultados de la prueba *Cf02* de caracterización final

Actividad 02: espontaneidad de los cambios de estado del agua

Completa la siguiente tabla, referida a los distintos procesos de cambio de estado del agua.

En las celdas de ΔH y ΔS, anota como crees que serán los valores correspondientes en cada caso (mayores, iguales o menores que cero, grandes o pequeños en valor absoluto...)

En la celda "¿Espontáneo?", explica en qué condiciones consideras que es (o no es) espontáneo cada proceso de cambio de estado. Si a espontaneidad del proceso depende de algún factor o condición específica, indícalo.

CAMBIO DE ESTADO	VARIACIÓN DE ENTALPÍA (ΔH)	VARIACIÓN DE ENTROPÍA (ΔS)	¿ESPONTÁNEO?

Ebullición	----------	----------	----------
Fusión	----------	----------	----------
Solidificación	----------	----------	----------
Condensación	----------	----------	----------
Sublimación s → g	----------	----------	----------
Sublimación g → s	----------	----------	----------

Cf_{02}[1]

A. Elige un proceso de cambio de estado de entre los arriba descritos. Para este proceso, justifica los valores que has predicho para ΔH y ΔS.

Cf_{02}[2]

B. Encuentras alguna relación entre la espontaneidad y los valores de ΔH y ΔS para el proceso que has elegido? Justifica tu respuesta.

C. ¿Depende de algún otro factor o condición la espontaneidad del proceso que has elegido? Justifica a qué se debe que exista / no exista tal relación.

Los resultados de la prueba *Cf02* se describen en la siguiente tabla:

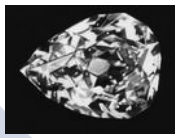
	Ana	Alfonso	Benito	Carlos	Adela	Clara	Darío
Recogen algún tipo de observación característica del fenómeno propuesto	✖	✖	✖		✖	✖	✓
Relacionan sus observaciones con las variaciones de las magnitudes fisicoquímicas que permiten estudiar la evolución del sistema	✖	✖	✖		✖	✖	✓
Relacionan sus observaciones con las interacciones sistema-entorno	✖	✖	✖		✖	✖	✓
Relacionan el proceso termodinámico con la evolución del sistema termodinámico	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran que los procesos directo e inverso se definen como tales al definir los estados inicial y final	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Hacen explícitas las causas por las que el sistema evoluciona mediante el proceso considerado	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan constructos del dominio macroscópico para explicar que el sistema evoluciona siguiendo el proceso considerado	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Construyen una explicación macroscópica sobre la evolución del sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Detallan los cambios que experimenta el sistema durante el proceso termodinámico	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen desde el punto de vista observacional los cambios que experimenta el sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Detallan los cambios que se producen en el comportamiento fisicoquímico del sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen los cambios que experimenta el sistema, utilizando magnitudes fisicoquímicas	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen los cambios del sistema utilizando magnitudes fisicoquímicas generales	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan la variación de la cantidad de materia del sistema para describir los cambios del mismo	✓						
Utilizan la variación de la cantidad de energía del sistema para describir los cambios del mismo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan el cambio en la composición en estados de agregación del sistema para describir los cambios del mismo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan el cambio en la composición química del sistema para describir los cambios del mismo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan la variación en el número de moles del sistema para describir los cambios del mismo	✓						
Utilizan las variaciones de las variables termodinámicas básicas para describir cómo evolucionan el entorno y/o el universo termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Reconocen cómo varían las condiciones de temperatura mientras tiene lugar el proceso	✓	✓	✓		✓		✓
Establecen una relación de causalidad entre el proceso y las condiciones de temperatura	✓	✓	✓		✓	✖	✓
Reconocen cómo varían las condiciones de presión mientras tiene lugar el proceso				✓			
El proceso sucede en unas condiciones de presión determinadas (reconocen la presión como una de las condiciones del proceso)				✓			
Establecen una relación de causalidad entre el proceso y las condiciones de presión				✓			
Construyen una interpretación de la dinámica del proceso, analizando su viabilidad termodinámica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reconocen que el proceso tiene un sentido determinado	✖	✓	✓		✖	✖	✓
Utilizan el concepto de espontaneidad (o viabilidad) de los procesos termodinámicos	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Reconocen la viabilidad termodinámica de un proceso determinado	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran que tiene lugar el proceso directo	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran que tiene lugar el proceso inverso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Consideran espontáneo todo proceso que es posible	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Consideran espontáneo todo proceso que sucede en las condiciones en las que se encuentra el sistema	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Consideran espontáneo todo proceso que sucede de manera natural (sin intervención externa)	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Describen cómo cambian su distribución energética las partículas del sistema	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Describen cómo cambia el desorden termodinámico del sistema debido al proceso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
La evolución del sistema no viene determinada por el balance energético del proceso, sino por la energía movilizable (relacionada con la distribución energética)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Construyen una interpretación de la dinámica del proceso, analizando el estado de equilibrio que alcanza el sistema			✓				
El equilibrio es "estático" a nivel macroscópico: la falta de suficiente energía "intercambiable" hace que el sistema deje de experimentar cambios (el proceso se detiene)			✓				
Reconocen que pueden establecerse balances sobre el proceso termodinámico	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Establecen balances sobre el sistema (real)	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Establecen sobre el sistema un balance energético neto	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Reconocen el sentido de las transferencias netas de energía sistema-entorno	✖	✖	✖		✖	✖	✖
El sistema pierde energía: exotermia	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Reconocen el sentido de las transferencias energéticas "netas" por calor	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Reconocen, en el cómputo total de energía puesta en juego, los aportes de energía por calor al sistema desde el entorno	✖	✖	✖		✖	✖	✖
Reconocen, en el cómputo total de energía puesta en juego, la liberación de energía por calor debido al proceso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Utilizan alguna clasificación del proceso atendiendo a criterios termodinámicos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Clasifican el proceso de acuerdo con los tipos de interacciones formadas y rotas en el proceso	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Clasifican el proceso de acuerdo con la posibilidad de que se produzca o no el proceso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Clasifican el proceso de acuerdo con el resultado del balance energético	✓				✓	✓	
Describen el proceso como exotérmico (balance energético negativo: el sistema libera energía)	✓				✓	✓	

VI.4.1.3. Descripción de resultados de la prueba *Cf03* de caracterización final

Actividad 03: 100% carbono



Se denominan alótropos de un elemento las distintas formas del elemento que difieren en propiedades físicas y químicas.

El elemento carbono nos brinda el ejemplo más famoso de alotropía: el grafito y el diamante son sus dos formas alotrópicas más conocidas (que no las únicas). Es obvio que grafito y diamante tienen propiedades, tanto físicas como químicas, extraordinariamente diferentes. ¡Y su composición química es idéntica: 100% carbono!

Cf_{03}[1]

A. Cita las propiedades físicas y químicas que encuentres diferentes para el caso del grafito y el diamante. ¿A qué se deben estas diferencias?

.....

B. ¿Crees que grafito y diamante tendrán el mismo valor de entropía? Justifica tu respuesta, indicando razonadamente cómo esperas que sea el/los valor(es) de entropía para grafito y diamante.

.....

Los resultados del *item Cf03(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Carlos	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO							
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS							

El diamante tiene menor entropía que el grafito	✓	✓	✓				✓
Ambos materiales tienen entropía diferente					✓		
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO							
Relaciones macroscópicas							
Reconocen explícitamente los sistemas							
Reconocen implícitamente los sistemas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Comparación de la dureza de ambos materiales	✓	✓		✓			✓
Comparación de la resistencia al rayado	✓	✓	✓				
Comparación de la densidad / grado de compacidad	✓		✓				
Comparación de la ductilidad ¿?							✓
Comparación del color / transparencia							✓
Comparación de la utilidad de ambos materiales							✓
Reconocen que ambos materiales tienen diferentes propiedades, pero no describen ninguna					✓	✓	
Relaciones microscópicas							
Hacen referencia a la composición química: carbono	✓				✓	✓	
Hacen referencia a la posibilidad de transformar grafito en diamante por presurización del material			✓				
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS							
Relaciones macroscópicas							
Las propiedades de los materiales se justifican por la temperatura a la que se forma el material					✓		
La entropía de las sustancias blandas es mayor que la de las sustancias duras		✓					
La entropía de las sustancias más ordenadas es menor que la de las sustancias más desordenadas							✓
Relaciones microscópicas							
Las propiedades (macroscópicas) de los materiales se justifican por la disposición de sus átomos	✓	✓					
Las propiedades de los materiales se justifican por la formación de enlaces					✓		
La distancia interatómica es menor en el diamante que en el grafito	✓						
El grado de simetría es mayor en el diamante	✓						
La entropía es mayor en las sustancias con mayor distancia interatómica	✓						
La entropía es mayor en las sustancias menos simétricas	✓						
La entropía es mayor en las sustancias que presentan sus partículas más desordenadas			✓				
INFERENCIAS Y PREDICCIONES							
De carácter macroscópico							
Justifica las propiedades macroscópicas del material a partir del grado de desorden de las partículas	✓						
Deduce el grado de desorden de las partículas a partir de las propiedades macroscópicas del material				✓			✓
Deduce el valor de la entropía del material a partir de conceptos microscópicos (partículas, enlaces)	✓			✓			✓
Deduce el valor de la entropía del material a partir de conceptos macroscópicos (propiedades observables)		✓					
No justifica el valor de la entropía de ambos materiales					✓		

VI.4.1.4. Descripción de resultados de la prueba *Cf04* de caracterización final

Actividad 04: variaciones de entropía en procesos físicos

Ejemplos muy conocidos de procesos físicos son la fusión de un sólido, la solidificación de un líquido y la disolución de un soluto sólido en un disolvente líquido.

Cf$_{04}$[1]

A. Explica, desde el punto de vista cualitativo, cómo esperas que sea la variación de entropía de estos procesos físicos.

Cf$_{04}$[2]

B. Explica cómo variará la entropía de un cristal perfecto de hielo a una temperatura inicial de 0 K, si lo calentamos, a presión atmosférica, hasta una temperatura final de 423 K. Elabora una gráfica que permita representar claramente tu explicación.

Los resultados del *item Cf04(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
En la fusión de un sólido, $\Delta S > 0$	✓	✓	✓	✓		✓
En la fusión de un sólido, $\Delta S < 0$				✓	✓	
En la solidificación de un líquido, $\Delta S < 0$	✓			✓		✓
En la solidificación de un líquido, $\Delta S > 0$					✓	
En la disolución de un sólido, $\Delta S > 0$	✓			✓		
En la disolución de un sólido, $\Delta S < 0$					✓	
En la disolución de un sólido, $\Delta S_{sólido} > 0$, mientras que $\Delta S_{disolvente} < 0$						✓
En la fusión de un sólido, la entropía del sistema aumenta		✓	✓			
En la solidificación de un líquido, la entropía del sistema disminuye		✓	✓			
En la disolución de un sólido, la entropía del sistema aumenta			✓			
En la disolución de un sólido, la entropía del sistema disminuye		✓				
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Describen explícitamente un sistema objeto de estudio		✓	✓			
Explicitan un estado inicial y un estado final		✓	✓			✓
Describen la progresiva variación de la entropía del sistema entre el estado inicial y el estado final (solamente en el proceso de disolución)		✓	✓			
Relaciona los procesos de fusión de un sólido y solidificación de un líquido						✓
Relaciones microscópicas						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Justifican el signo de $\Delta S_{sistema}$ por comparación		✓				

explíCitan entre los valores de entropía final e inicial						
Justifican su predicción sobre $\Delta S_{sistema}$ en términos de mayor o menor orden en el sistema		✓				✓
Reconocen implícitamente que, al final de un proceso termodinámico, la entropía del sistema alcanza un valor mínimo o máximo		✓	✓			
En los procesos de transición de fase, justifican el signo de $\Delta S_{sistema}$ basándose en el estado de agregación del sistema en los estados inicial y final			✓			✓
Relaciones microscópicas						
Justifican su predicción sobre $\Delta S_{sistema}$ en términos de mayor o menor orden de las partículas del sistema			✓			
En el proceso de disolución, justifican el signo de $\Delta S_{sistema}$ basándose en la interacción de las partículas de soluto con las de disolvente			✓			✓

Los resultados del *item Cf04(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
La entropía del cristal de hielo sometido a las condiciones descritas, aumentará		✓	✓			✓
La entropía del cristal de hielo sometido a las condiciones descritas, disminuirá				✓		✓
La variación de entropía del cristal de hielo sometido a las condiciones descritas, será menor de cero					✓	
Justifica la variación de entropía del cristal		✓			✓	✓
Realiza una representación gráfica para describir la variación de la entropía del cristal	✓		✓			✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Reconoce (implícitamente) un sistema objeto de estudio					✓	✓
Describe que el cristal sufre, durante el proceso termodinámico, algún proceso de transición de fase		✓			✓	
Reconoce el proceso de transición sólido – líquido		✓			✓	
Representa en el eje X la entropía	✓					
Representa en el eje Y la entropía			✓			
Representa en el eje X la temperatura			✓			
Representa en el eje Y la temperatura	✓					✓
La temperatura representada es absoluta	✓		✓			
Indica las unidades de temperatura (K)	✓					
Indica las unidades de entropía						
Indica explícitamente los valores de temperatura inicial y final	✓			✓		
Rotula el origen de coordenadas	✓		✓			
Divide el eje X en intervalos de valores			✓			
Divide el eje Y en intervalos de valores						
La representación gráfica es de trazo continuo	✓		✓			✓
Señala el punto correspondiente al valor $T = 423$ K	✓					
Representa una dependencia exponencial (*pseudo*)exponencial de la entropía frente a la temperatura	✓		✓			
Relaciones microscópicas						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Justifica el aumento de entropía del sistema basándose en procesos de transición de fase		✓				
Justifica la disminución de entropía del sistema basándose en el aumento de la temperatura						✓

Utilizan la simbología ΔS para referirse a la entropía	✓					
Utilizan la simbología *t* para designar a la temperatura absoluta	✓					
Rotula como 0 el origen de coordenadas (0,0)	✓					

VI.4.1.5. Descripción de resultados de la prueba *Cf05* de caracterización final

Actividad 05: un polímero

El hule es un material polimérico, y su estructura le proporciona interesantes propiedades. Por ejemplo, al estirar rápidamente una banda de hule, podemos observar que su temperatura aumenta ligeramente. Y, si soltamos rápidamente una banda de hule estirada, notaremos una ligera disminución de temperatura.

Cf_{05}[1]

A. Si tienes que explicar a alguien, utilizando lo que sabes de Termodinámica Química, estos fenómenos: ¿a qué conceptos y enunciados recurrirías? Justifica tu respuesta.

.....

B. Explica estos dos fenómenos desde el punto de vista termodinámico.

.....

Los resultados del *item Cf05(1)* se describen en la siguiente tabla:

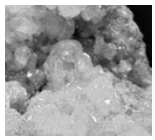
UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
Al estirar la banda de hule, su entropía disminuye	✓	✓	✓			✓
Al estirar la banda de hule, su entropía aumenta	✓		✓	✓		✓
Al soltar la banda de hule, su entropía disminuye		✓				✓
Describe / explica el proceso termodinámico asociado al estiramiento de la banda de hule	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Describe / explica el proceso termodinámico asociado a la liberación de la banda de hule		✓		✓		✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Citan el concepto de entropía						✓
Citan el concepto de entalpía						✓
Citan el concepto de calor	✓					
Citan el concepto de temperatura	✓	✓				
Citan el concepto de trabajo	✓					
Citan el concepto de presión		✓				
Citan el concepto de masa		✓				

Relaciones microscópicas						
Citan el concepto de enlace químico		✓				
Citan el concepto de (des)orden	✓					
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
Justifican la utilización de los conceptos que citan porque tienen relación con los procesos que tienen lugar	✓					
Utilizan en su explicación el concepto de sistema					✓	
Utilizan en su explicación el concepto de entropía	✓	✓	✓			✓
Utilizan en su explicación el concepto de rozamiento			✓			
Utilizan en su explicación el concepto de trabajo	✓				✓	✓
Utilizan en su explicación el concepto de fuerza					✓	✓
Utilizan en su explicación el concepto de calor	✓	✓	✓	✓	✓	
Utilizan en su explicación el concepto de temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizan en su explicación el concepto de presión	✓	✓				
Utilizan en su explicación el concepto de energía	✓			✓	✓	
Utiliza (implícitamente) la conservación de la energía	✓		✓	✓	✓	
Utiliza (implícitamente) el concepto de energía interna	✓		✓	✓	✓	
Explicitan la realización de un trabajo sobre el sistema (estiramiento de la banda de hule)	✓				✓	
Consideran el trabajo como una fuerza que se aplica sobre el sistema					✓	✓
Apelan a un aumento en la energía del sistema como consecuencia de la realización de un trabajo sobre el sistema (estiramiento de la banda de hule)					✓	✓
Relacionan el estiramiento de la banda de hule con el estiramiento de los enlaces del sistema		✓				
Apelan a un aumento en la energía del sistema como consecuencia del estiramiento de la banda de hule	✓			✓		
Justifica el (des)ordenamiento de las partículas a partir de la variación de la entropía			✓			✓
Identifica el (des)ordenamiento de las partículas con la variación de la entropía	✓					✓
Relaciona el trabajo realizado (sobre el sistema y por el sistema) con la variación de la entropía del sistema	✓	✓				✓
Identifica la distancia de enlace con la variación de la entropía	✓			✓		
Justifica que la entropía del sistema aumente al estirar la banda de hule, basándose en que se producen choques entre las partículas del sistema			✓			
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe a un proceso de calor	✓		✓		✓	
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe a un aumento en las distancias de enlace		✓				
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe al proceso de calor generado por el rozamiento entre las partículas			✓			
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe al proceso de calor generado por el aumento de energía en el sistema			✓		✓	
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe a una gran liberación de la energía que se ha aportado al sistema	✓		✓	✓	✓	✓
El aumento de temperatura que se produce al estirar la banda de hule, se debe al trabajo que se ha aportado al sistema					✓	✓
Explicita la existencia de una relación entre la entalpía y la temperatura						✓
Explicita la existencia de una relación entre la entropía y la temperatura						✓
El aumento de presión que se produce al estirar la banda de hule, se debe al estiramiento del los enlaces químicos del sistema		✓				
La disminución de temperatura que se produce cuando se suelta la banda de hule, se debe a la disminución de la presión relacionada con una disminución en las distancias de enlace		✓				
La disminución de temperatura que se produce al soltar la banda de hule, se debe que anteriormente se produjo una gran liberación de la energía previamente aportada al sistema				✓		
Asocia la disminución de temperatura que se produce al soltar la banda de hule, con la realización de trabajo que "se va" del sistema						✓
Relaciones microscópicas						
Utilizan en su explicación el concepto de partícula			✓			

Utilizan en su explicación el concepto de enlace químico		✓				
Utilizan en su explicación el concepto de choque entre partículas			✓			
Utilizan en su explicación el concepto de (des)orden	✓		✓			✓

VI.4.1.6. Descripción de resultados de la prueba *Cf06* de caracterización final

Actividad 06: azufre en los volcanes



En las zonas volcánicas se observa con gran frecuencia la deposición de azufre sólido en las áreas cercanas al volcán. Estas deposiciones se consideran causadas por la reacción del sulfuro de hidrógeno con el dióxido de azufre que es expulsado por el volcán:

$2\ H_2S_{(g)} + SO_{2\ (g)} \rightarrow 3\ S_{(s)} + 2\ H_2O_{(g)}$

Cf06[1]

A. Con ayuda de los datos termodinámicos tabulados, ¿puedes predecir si la reacción entre el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de azufre es más o menos eficaz en condiciones de altas temperaturas?

Cf06[2]

B. El carbón que emplean como combustible las centrales térmicas contiene por lo general importantes concentraciones de azufre. La combustión de este carbón rico en azufre es la responsable de que las centrales térmicas emitan grandes cantidades de SO_2, uno de los contaminantes responsables de la "lluvia ácida".

¿Cómo puede la Termodinámica ayudarte a elegir algún método para la eliminación de la "lluvia ácida" o la minimización de sus consecuencias?

Los resultados del *item Cf06(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO					
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS					
A altas temperaturas, la reacción será más eficaz	✓	✓			✓
A altas temperaturas, la reacción será más eficaz			✓		
Justifica su respuesta en los resultados de sus cálculos	✓		✓		✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO					
Relaciones macroscópicas / Estrategias de cálculo					
Calcula la ΔH y la ΔS asociada a la reacción a partir de los datos recogidos en las tablas termodinámicas			✓		✓
Considera T como incógnita de la ecuación Fundamental de la			✓		✓

Termodinámica					
Evalúa en qué rangos de *T* es positivo, y en cuáles negativo, el signo de ΔG para la reacción			✓		
Utiliza los datos de ΔG de las tablas termodinámicas para calcular ΔG	✓				
Calcula el valor de *T* para el cual se anula la ΔG de la reacción	✓				
Relaciones macroscópicas / Estrategias de cálculo					
Escribe la reacción entre el $H_2S_{(g)}$ y el $SO_{2(g)}$	✓				
Ajusta la reacción	✓				
Recoge los datos termodinámicos en una tabla	✓			✓	
Transcribe adecuadamente los datos termodinámicos					✓
Explicita formalmente las ecuaciones de ΔH y ΔS					
Escribe la Ecuación Fundamental de la Termodinámica	✓		✓	✓	✓
Realiza las operaciones algebraicas adecuadamente	✓		✓		✓
Desglosa y simboliza los pasos de las operaciones algebraicas que realiza	✓		✓		
Expresa los datos de ΔH y ΔS de la reacción con unidades	✓				✓
Expresa los datos de ΔH y ΔS de la reacción con unidades adecuadas: kJ y kJ/K, respectivamente					
Expresa los datos de ΔH y ΔS de la reacción con unidades no adecuadas: kJ/mol y kJ/mol·K, respectivamente	✓				✓
Utilizan el símbolo º para indicar que los datos de ΔH, ΔS y ΔG son normales	✓			✓	
Utiliza el término ΔS para referirse a los datos de S	✓			✓	
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS					
Relaciones macroscópicas					
Una reacción es más eficaz cuanto más espontánea sea	✓				✓

Los resultados del *item Cf06(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Adela	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO			
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS			
Propone métodos para reducir o eliminar in situ la cantidad de SO_2 emitido	✓		✓
Propone métodos para reducir o eliminar el contenido en azufre del carbón		✓	
Hace referencia a métodos para reducir o eliminar in situ la cantidad de SO_2 emitido	✓		
Hace referencia a métodos para reducir o eliminar el contenido en azufre del carbón	✓		
Propone buscar combustibles alternativos al carbón		✓	
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO			
Relaciones macroscópicas			
El combustible alternativo al carbón ha de ser poco contaminante		✓	
La combustión del combustible alternativo al carbón debe ser exotérmica (liberar energía)		✓	
La ΔS asociada a la combustión del combustible alternativo al carbón debe ser negativa		✓	
La ΔG de la combustión del combustible alternativo al carbón debe ser positiva a altas temperaturas (proceso no espontáneo)		✓	
Relaciones microscópicas			
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS			
Relaciones macroscópicas			

Relaciona las variables termodinámicas con las reacciones químicas propuestas			
Relaciona los métodos propuestos / citados con los cálculos termodinámicos		✓	✓
Hace referencia implícita a reacciones químicas (espontáneas) para eliminar sustancias contaminantes	✓		
Hace referencia a la influencia de la temperatura en la posibilidad de que una reacción química tenga lugar	✓	✓	
Hace referencia a la naturaleza química de las sustancias implicadas en los métodos propuestos / citados		✓	

VI.4.1.7. Descripción de resultados de la prueba *Cf07* de caracterización final

Actividad 07: ¿agua?

En condiciones de temperatura ambiente (25 °C) y presión atmosférica (1 atm), la reacción de formación del agua líquida a partir de sus elementos presenta una variación de entalpía de −68,3 kcal/mol y una variación de energía de Gibbs de −236,25 kJ/mol.

Cf07[1]

A. ¿Tiene lugar esta reacción a temperatura ambiente? Justifica tu respuesta.

.....

B. ¿Qué otras conclusiones puedes extraer sobre este proceso a través de conceptos y enunciados relacionados con la Termodinámica Química?

.....

Los resultados del *item Cf07(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO							
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS							
La reacción descrita no tiene lugar a temperatura ambiente	✓	✓		✓	✓		✓
La reacción tiene lugar a temperatura ambiente			✓		✓	✓	
Es posible que la reacción tenga lugar a temperatura ambiente		✓					
La reacción descrita tiene lugar a altas temperaturas	✓				✓		
Consideran que la reacción es espontánea	✓			✓		✓	✓
Consideran que la reacción es no espontánea a bajas temperaturas					✓		
Consideran que la reacción es espontánea a altas temperaturas					✓		
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO	✓	✓					✓
Relaciones macroscópicas	✓	✓		✓			
Escribe la ecuación correspondiente a la reacción	✓			✓			
Escribe el factor de conversión caloría → Julio	✓				✓		✓
Convierte a unidades de kJ/mol la ΔH asociada a la reacción				✓	✓		✓
Interpreta mal el valor de ΔG				✓			✓
Deciden la espontaneidad de la reacción utilizando como criterio el signo de la ΔG de la reacción	✓	✓		✓	✓	✓	
Explicitan que el signo de la ΔG de la reacción es un indicadore de la espontaneidad de la reacción				✓			

Deciden la espontaneidad de la reacción aplicando los distintos casos de la tabla de términos				✓	✓		✓
Deciden la espontaneidad de la reacción utilizando como criterio el signo de la ΔH de la reacción			✓				
Calcula la ΔS asociada a la reacción					✓		✓
Utiliza en los cálculos la temperatura en grados Celsius	✓				✓	✓	✓
Expresan el valor de ΔS acompañado de las unidades adecuadas (SI)				✓	✓		
No extraen ninguna conclusión no relacionada con la espontaneidad	✓	✓	✓	✓		✓	
Explicita que el proceso es exotérmico					✓		
Cita la exotermia/endotermia del proceso, sin definirla					✓		✓
El proceso presenta poco desorden					✓		
Relaciona el "grado de desorden del proceso" con la ΔS del mismo					✓		
Relaciones microscópicas							
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS							
Relaciones macroscópicas							
No justifican por qué la reacción no tiene lugar a T ambiente	✓	✓			✓		
Es posible que realicen la afirmación basándose en que la reacción no es observable	✓	✓	✓		✓		
Para que la reacción tenga lugar, ha de aportarse energía al sistema	✓						
Al aportar energía al sistema, la temperatura de éste aumenta	✓						
La reacción es espontánea a altas temperaturas porque sólo en estas condiciones el sistema tiene la energía suficiente como para comenzar la reacción	✓						
El hecho de que la reacción sea espontánea no implica que tenga lugar temperatura ambiente	✓	✓		✓			
La reacción puede tener lugar a temperatura ambiente porque es espontánea		✓		✓			
La reacción es espontánea porque desprende energía			✓				
La reacción tendrá lugar si cumplena las condiciones necesarias para que suceda				✓			
La reacción tiene lugar porque es espontánea						✓	

VI.4.2. Análisis mediante esquemas de conocimiento

En este apartado se analizan los cinco esquemas de razonamiento y los cuatro esquemas de acción que activaron los alumnos en las pruebas de caracterización final. Las relaciones fundamentales que constituyen los esquemas de razonamiento y acción idiosincrásicos se han extraído de las manifestaciones escritas que produjeron los estudiantes en sus respuestas a las pruebas *Cf01*,…,*Cf07*. Para identificar regularidades en los esquemas, en las tablas de análisis se recogen las relaciones pertenecientes a los distintos ***ER*** o ***EA***, asociadas a la activación que generó cada individuo de la muestra.

Los dos apartados siguientes se dedican a describir e interpretar los esquemas de razonamiento (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento ER1, …, ER5*, pág. 1098) y de acción (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción EA1, …, EA4*, pág. 1113) idiosincrásicos de los alumnos, ordenados en función del esquema del que forman parte y de la complejidad de la estructura esquemática. Al igual que en los ***Capítulos*** anteriores, cada apartado dedicado a un esquema contiene a su vez dos: en "análisis general de los

resultados" se detalla la frecuencia activación de las relaciones de la ciencia escolar para las dimensiones establecidas, y en "esquemas idiosincrásicos de los alumnos", se describen e interpretan las tablas de datos.

VI.4.2.1. Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento *ER1*, …, *ER5*

Los apartados que vienen a continuación se dedican a la descripción de los esquemas de razonamiento ***ER1***, ***ER2***, ***ER3***, ***ER4*** y ***ER5*** que activaron los alumnos de la muestra en las pruebas de caracterización final.

Esquema *ER1*: *sistemas termodinámicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER1*** (***Sistemas termodinámicos***) que desarrollaron los alumnos en la caracterización final.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, con la frecuencia de activación *f* de cada relación, esto es, el número de veces que los alumnos hicieron explícita cada relación en sus respuestas a las tareas de las pruebas. En la última columna de la tabla se listan los códigos (***Cód***) que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, representadas por el símbolo ***S***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Sistemas termodinámicos*** *(****ER1****), extraídas de las pruebas de caracterización final*

RELACIÓN	*f*	Cód
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	45	***S01***
UNIVERSO consta de ENTORNO	23	***S02***
SISTEMA tiene MATERIA	39	***S03***
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	20	***S04***
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	25	***S05***
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	16	***S06***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	16	***S07***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	11	***S08***
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	11	***S09***
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	13	***S10***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	3	***S11***
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	0	***S12***
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	3	***S13***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	0	***S14***
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	0	***S15***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	0	***S16***
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	0	***S17***
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	0	***S18***
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	42	***S19***
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	***S20***
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	44	***S21***

FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	0	***S22***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	33	***S23***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	1	***S24***
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	19	***S25***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	31	***S26***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	21	***S27***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	0	***S28***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	***S29***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	33	***S30***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	34	***S31***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	10	***S32***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	8	***S33***
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	8	***S34***
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	8	***S35***
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	0	***S36***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	10	***S37***
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	15	***S38***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	0	***S39***
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	9	***S40***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	33	***S41***
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	0	***S42***
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	3	***S43***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	2	***S44***
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	0	***S45***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	10	***S46***
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	10	***S47***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	41	***S48***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	40	***S49***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	31	***S50***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	28	***S51***
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	16	***S52***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	16	***S53***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	33	***S54***
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	26	***S55***
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	0	***S56***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	15	***S57***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	15	***S58***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	9	***S59***

Activación de las relaciones del esquema de razonamiento sistemas termodinámicos (ER1) en cada una de las 7 pruebas de la batería de caracterización final de la muestra

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Cf01	158	7	27	(0,27)
Cf02	160	7	32	(0,29)
Cf03	90	7	20	(0,19)
Cf04	101	6	23	(0,22)
Cf05	115	6	24	(0,22)
Cf06	113	5	28	(0,28)
Cf07	142	7	28	(0,28)

Se presentaron a ***Cf*** 10 alumnos (todos menos Débora), pero Berta y Diana entregaron sus guiones completamente en blanco. Brais respondió a una única prueba, (*Cf07*), Benito dejó en blanco *Cf06*, e Carlos contestó a las tres primeras.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Sistemas termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos que demostraron los

alumnos en sus respuestas a las pruebas de la batería de caracterización final de la muestra, categorizados en niveles y subniveles que se denominan niveles *f* (f_1, f_2, …, siendo f_1 el esquema más alejado del referencial de la ciencia escolar); los subniveles están rotulados como f_{1a}, f_{1b}, …; f_{2a}, f_{2b}, …; siendo los subniveles *a* los más alejados del referencial dentro de cada nivel.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER1, sistemas termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	f_4			f_3			f_2	f_1	-		
	f_{4c}	f_{4b}	f_{4a}	f_{3c}	f_{3b}	f_{3a}					
ALUMNOS	**Darío**	**Ana**	**Adela**	**Clara**	**Benito**	**Alfonso**	**Carlos**	**Brais**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
UNIVERSO consta de ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA tiene MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	✓	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	✓	💣	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	💣	✓	·	·	✓	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	·	·	·	·	✓	✓	·	·			
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	✓	💣	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	💣	✓	✓	✓	💣	💣	✓	·			
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

Esquema *ER2*: *procesos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en las pruebas de caracterización final.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER2*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron en la caracterización final de la muestra. La tabla indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***P***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento procesos termodinámicos (ER2), extraídas de las pruebas de caracterización final

RELACIÓN	*f*	Cód
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	39	*P01*
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	0	*P02*
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	0	*P03*
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	9	*P04*
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	29	*P05*
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	3	*P06*
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	0	*P07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	0	*P08*
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	9	*P09*
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	3	*P10*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	0	*P11*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	0	*P12*
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	0	*P13*

PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	0	*P14*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	0	*P15*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	0	*P16*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	0	*P17*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	11	*P18*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	7	*P19*
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	9	*P20*
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	0	*P21*
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	0	*P22*
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	1	*P23*
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	0	*P24*
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P25*
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*P26*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	1	*P27*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	0	*P28*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	3	*P29*
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	0	*P30*
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	0	*P31*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	0	*P32*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	5	*P33*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	6	*P34*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	0	*P35*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	*P36*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*P37*
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	12	*P38*
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	10	*P39*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	7	*P40*
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	3	*P41*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	1	*P42*
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	1	*P43*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	0	*P44*
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	0	*P45*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	0	*P46*
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	0	*P47*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	0	*P48*
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	0	*P49*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	0	*P50*
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	0	*P51*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	0	*P52*
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	0	*P53*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	26	*P54*
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	19	*P55*
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	0	*P56*
CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P57*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	11	*P58*
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	5	*P59*
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	6	*P60*
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	*P61*

Activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***procesos termodinámicos (ER2)*** *en cada una de las 7 pruebas de la batería de caracterización final de la muestra*

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Cf01	27	7	4	(0,4)
Cf02	30	7	8	(0,5)
Cf03	14	7	7	(0,5)
Cf04	48	6	10	(0,10)
Cf05	39	6	11	(0,9)
Cf06	33	5	9	(0,9)
Cf07	53	7	12	(0,12)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Procesos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de razonamiento idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER2, procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	f_3			f_2			f_1		-		
	f_{3b}		f_{3a}	f_{2c}	f_{2b}	f_{2a}	f_{1b}	f_{1a}			
ALUMNOS	**Ana**	**Benito**	**Darío**	**Adela**	**Alfonso**	**Clara**	**Carlos**	**Brais**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	✓			
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	✓			
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	✓	💣	✓	💣	·	✖	·	·			
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	·	✓	·	·			
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	✓	·			
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·			
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	✓	·	✖	·	·	·	·	·			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	·	✓	·	·	✓	·	·			
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			

TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	·	·	✓	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	·	✓	·	·	✓	·	✓	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	·	✓	·	·	·	·	·	·			
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	✓	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			

Esquema *ER3*: *aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos en las pruebas de caracterización final de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER3*** de los alumnos, con las correspondientes frecuencias de activación *f* y los códigos ***Cód*** mediante los que se describen las relaciones del esquema, representadas por el símbolo ***A***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3), extraídas de las pruebas de caracterización final

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	5	***A01***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	0	***A02***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	17	***A03***
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	9	***A04***
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	13	***A05***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	5	***A06***
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	3	***A07***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	9	***A08***
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	***A09***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	0	***A10***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	***A11***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	32	***A12***
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	32	***A13***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	***A14***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	37	***A15***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	31	***A16***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	30	***A17***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	2	***A18***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	10	***A19***
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	9	***A20***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	35	***A21***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	27	***A22***
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	27	***A23***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	13	***A24***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	4	***A25***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	0	***A26***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	6	***A27***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	27	***A28***
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	16	***A29***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	14	***A30***
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	4	***A31***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	0	***A32***
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A33***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	0	***A34***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	0	***A35***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	0	***A36***
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	0	***A37***
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A38***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	10	***A39***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A40***
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	0	***A41***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A42***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	0	***A43***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	15	***A44***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	1	***A45***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	11	***A46***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	10	***A47***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A48***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	15	***A49***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO ($dG < 0$)	14	***A50***

VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" (d*G* = 0)	2	***A51***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO (d*G* > 0)	14	***A52***

Activación de las relaciones del esquema de razonamiento aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3) en cada una de las 7 pruebas de caracterización final

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Cf01	73	7	13	(0,13)
Cf02	128	7	25	(0,23)
Cf03	7	7	5	(0,4)
Cf04	48	6	11	(0,11)
Cf05	74	6	14	(0,14)
Cf06	72	5	21	(0,21)
Cf07	102	7	23	(0,20)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, se elaboraron los ***ER3*** idiosincrásicos de los alumnos, que después se clasificaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER3, aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	f_2						f_1		-		
	f_{2d}		f_{2c}	f_{2b}		f_{2a}	f_{1b}	f_{1a}			
ALUMNOS	**Clara**	**Darío**	**Benito**	**Alfonso**	**Adela**	**Ana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✖	✓	✓	✓	✓	·			
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	✓	✓	·	✓	✓	✓	·	·			
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	✖	✖	✖	✖	✖	✖	✓	·			
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	✖	✓	✓	✓	✖	✖	✓	✓			
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	✖	✓	✓	✓	✖	✖	✓	✓			

EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	·	✓	✓	·	·	·	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	💣	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	✓	✓	·	·	✓	✓	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	✓	💣	✓	💣	💣	✖	✓	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	✓	💣	✓	💣	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	✓	💣	✓	✓	💣	💣	·	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	·	·	✓	✓	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	·	·	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO (dG < 0)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" (dG = 0)	·	·	✓	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO (dG > 0)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

Esquema ER4: Dinámica de los procesos químicos

Se presentan los esquemas de razonamiento de *Dinámica de los procesos químicos* que desarrollaron los alumnos en la caracterización final de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, los subesquemas y las relaciones que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento *Dinámica de los procesos químicos* de los alumnos, y se indica la frecuencia de activación ***f*** y el código ***Cód*** de identificación las relaciones de ***ER4***, representadas por el símbolo ***D***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento Dinámica de los procesos químicos (ER4), extraídas de las pruebas de caracterización final

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	39	*D01*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	38	*D02*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	21	*D03*
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	4	*D04*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	0	*D05*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	0	*D06*
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	0	*D07*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	0	*D08*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	36	*D09*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	3	*D10*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D11*
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D12*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D13*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	0	*D14*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	0	*D15*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D16*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D17*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D18*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	0	*D19*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D20*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	3	*D21*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	3	*D22*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	12	*D23*
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	2	*D24*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	4	*D25*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	4	*D26*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	4	*D27*
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	0	*D28*
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	0	*D29*

TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D30*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	5	*D31*
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D32*
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D33*
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	0	*D34*
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D35*
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D36*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	2	*D37*
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D38*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	2	*D39*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	0	*D40*
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	0	*D41*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	0	*D42*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	0	*D43*

Activación de las relaciones del esquema de razonamiento Dinámica de los procesos químicos (ER4) en cada una de las 7 pruebas de la caracterización final

ACTIVIDAD	***F***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Cf01	24	7	6	(0,6)
Cf02	33	7	7	(0,7)
Cf03	4	7	3	(0,2)
Cf04	28	6	7	(0,7)
Cf05	24	6	4	(0,4)
Cf06	37	5	10	(0,10)
Cf07	32	7	8	(0,6)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Dinámica de los procesos químicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER4***, categorizados en los niveles y subniveles de la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ER4, Dinámica de los procesos químicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	f_3	f_2				f_1			-		
		f_{2b}	f_{2a}			f_{1b}		f_{1a}			
ALUMNOS	**Ana**	**Benito**	**Clara**	**Adela**	**Darío**	**Alfonso**	**Carlos**	**Brais**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	·	✓	✓	✓	·	·	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	·	·	·	·	·	·	·	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	·	·	·	·	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA	·	·	·	·	·	·	·	·			

TERMODINÁMICA											
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	·	·	·	·	✓	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	·	·	·	·	✓	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	✓	✓	✓	💣	✓	·	·			
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	·	·	✓	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	·	✓	✓	✓	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	·	✓	✓	💣	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	·	✓	✓	✓	·	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	·	✓	✓	·	✓	✓	·	·			
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	·	✓	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	·	✓	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			

Esquema *ER5*: *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento de ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos en la caracterización final de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, junto con los subesquemas y sus relaciones, que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento

ER5 de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las pruebas de caracterización final. Se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones del esquema ***aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos*** están representadas por el símbolo ***M***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5), extraídas de las pruebas de caracterización final

RELACIÓN	*f*	Cód
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	6	*M01*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	4	*M02*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	2	*M03*
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	1	*M04*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M05*
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M06*
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	0	*M07*
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M08*
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	24	*M09*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	3	*M10*
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	2	*M11*
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	3	*M12*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	3	*M13*
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M14*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	1	*M15*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M16*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	22	*M17*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M18*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	20	*M19*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	22	*M20*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	15	*M21*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	23	*M22*
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M23*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	0	*M24*
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	3	*M25*
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	0	*M26*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	*M27*
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	0	*M28*
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	0	*M29*

Activación de las relaciones del esquema de razonamiento Aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5) en cada una de las 7 pruebas de la caracterización final

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Cf01	52	7	13	(0,10)
Cf02	35	7	6	(0,6)
Cf03	22	7	6	(0,6)
Cf04	37	6	11	(0,11)
Cf05	8	6	7	(0,6)
Cf06	0	5	0	(0,0)
Cf07	2	7	1	(0,1)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***ER5***, se explicitan los esquemas idiosincrásicos de los alumnos, categorizados en niveles y subniveles.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER5***, ***Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos****, de los alumnos*

NIVELES	f_5	f_4	f_3	f_2				f_1	-		
				f_{2d}	f_{2c}	f_{2b}	f_{2a}				
ALUMNOS	**Benito**	**Darío**	**Ana**	**Alfonso**	**Adela**	**Clara**	**Carlos**	**Brais**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	✓	✓	·	✓	✓	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	✓	✓	·	✓	·	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	·	·	·	·	✓	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	·	✓	·	·	·	✓	·			
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	✓	*	✓	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	✓	·	✓	·	·	·	✓	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	✓	·	·	·	·	·	·	·			
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	✓	✓	·	·	·	✓	·	·			
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una	·	·	·	·	·	·	·	·			

pérdida de ESTABILIDAD											
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	·	✓	✓	·	·	·	·	·			

VI.4.2.2. Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción *EA1, …, EA4*

Se describen los esquemas de acción ***EA1***, ***EA2***, ***EA3*** y ***EA4*** que activaron los alumnos en la caracterización final de la muestra. La discusión de los ***EA***s apenas se ilustra con ejemplos de las respuestas del alumnado, porque en el apígrafe dedicado al análisis *item* a *item* ya se han descrito las principales destrezas y estrategias que utilizaron los alumnos a la hora de elaborar sus respuestas a las pruebas de caracterización final de la muestra. Remitimos a las páginas concretas del análisis para la consulta de la información sobre estos aspectos del aprendizaje demostrado.

Esquema *EA1*: *Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización final de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones de los esquemas de acción ***EA1*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas en la caracterización final. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***EA1***, representadas por el símbolo ***I***.

Tabla 53: frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1), extraídas de las pruebas de caracterización final

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	39	*I01*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	45	*I02*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	45	*I03*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	39	*I04*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	42	*I05*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	42	*I06*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	30	*I07*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	1	*I08*

RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	34	*I09*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	25	*I10*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	16	*I11*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	30	*I12*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	14	*I13*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	37	*I14*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	30	*I15*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	2	*I16*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	10	*I17*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	27	*I18*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	13	*I19*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	27	*I20*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	14	*I21*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	31	*I22*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	31	*I23*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	31	*I24*
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	31	*I25*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	0	*I26*
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	0	*I27*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	15	*I28*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	5	*I29*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	10	*I30*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	45	*I31*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	1	*I32*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	1	*I33*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	4	*I34*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	4	*I35*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	3	*I36*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	0	*I37*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	1	*I38*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	3	*I39*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	40	*I40*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	45	*I41*

Activación de las relaciones del esquema de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1)*** *en cada una de las 7 pruebas de la batería de caracterización final*

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Cf01	145	7	24	(0,22)
Cf02	175	7	28	(0,28)

Cf03	72	7	18	(0,17)
Cf04	98	6	23	(0,23)
Cf05	133	6	28	(0,25)
Cf06	111	5	27	(0,27)
Cf05	139	7	27	(0,25)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

Sobre la base del referencial ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en niveles y subniveles

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA1, Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	f_4		f_3				f_2	f_1	-		
			f_{3b}		f_{3a}						
ALUMNOS	**Ana**	**Benito**	**Clara**	**Darío**	**Adela**	**Alfonso**	**Carlos**	**Brais**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	·	·	·	·	·	✓	·	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	✓	·	·	·	✓	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA											
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	·	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓*	✓	✓	✓	✓	✓*	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	·	✓	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	·	✓	·	·	·	·	·	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	·	✓	✓	✓	·	·	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	·	✓	✓	✓	·	·	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	·	·	·	·	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	·	·	·	·	✓	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

Esquema *EA2*: *Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización final de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge los elementos y relaciones de los esquemas de acción ***EA2*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas en la caracterización final, cada una con su frecuencia de activación *f* correspondiente (número de veces

que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y el códigos ***Cód*** que se utiliza para identificarla dentro del esquema de acción ***EA2*** (símbolo ***R***).

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** *(EA2), extraídas de las pruebas de la batería de caracterización final de la muestra*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	44	*R01*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	44	*R02*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	44	*R03*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	31	*R04*
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	31	*R05*
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	44	*R06*
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	43	*R07*
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	33	*R08*
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	31	*R09*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	16	*R10*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	12	*R11*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	11	*R12*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	2	*R13*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	11	*R14*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	3	*R15*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	0	*R16*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	11	*R17*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	7	*R18*
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	7	*R19*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	3	*R20*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	12	*R21*
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	2	*R22*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	3	*R23*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	6	*R24*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	2	*R25*
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	1	*R26*
CALOR se mide en JULIO/MOL	0	*R27*
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	0	*R28*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	0	*R29*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	5	*R30*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	2	*R31*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	3	*R32*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	6	*R33*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	7	*R34*
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	3	*R35*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	6	*R36*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	37	*R37*
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	41	*R38*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	41	*R39*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	41	*R40*

Activación de las relaciones del esquema de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)*** *en cada una de las 7 pruebas de la batería de caracterización final de la muestra*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Cf01	105	7	20	(0,18)
Cf02	114	7	19	(0,19)
Cf03	63	7	9	(0,9)
Cf04	88	6	18	(0,18)
Cf05	74	6	13	(0,13)
Cf06	98	5	28	(0,24)
Cf07	104	7	25	(0,20)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos. Se categorizaron en los niveles y subniveles de la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA2, ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos*** *termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	f_4	f_3			f_2			f_1	-		
		f_{3b}	f_{3a}		f_{2b}	f_{2a}	f_{2b}				
ALUMNOS	**Darío**	**Clara**	**Adela**	**Ana**	**Benito**	**Alfonso**	**Carlos**	**Brais**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	✓	✓	💣	💣	✓	✓	✓	·			
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✖	✓	✓	·	✓			
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	·	✓	·	✓	·	·	·	·			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	✓	·	·	✓	✓	·	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	·	·	·	·	·	·	·	·			

ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	✓	✓	✓*	✓*	✓	✓*	·	·			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	·	✗	✗	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	✓*	·	·	✓	✓	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	✓	✓	✗	✗	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	·	·	✓	·	·	·	·	·			
CALOR se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	✓	·	✓	✓	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	✓	✓	·	✗	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	✓	·	·	✓	·	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	·	✓	✓	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	·			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	✓*	✓	✗	✓*	✓*	✓*	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	✓	✓	✓	✓*	✓*	✓*	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	✓	✓	✓	✓*	✓*	✓*	✓	✓			

Esquema *EA3*: *Representación gráfica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización final de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de acción ***EA3*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron en la caracterización final de la investigación. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***G***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** *(EA3), extraídas de las pruebas de caracterización final*

RELACIÓN	*f*	Cód
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	3	*G01*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	1	*G02*
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	1	*G03*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	5	*G04*
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	3	*G05*
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	3	*G06*
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	3	*G07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	0	*G08*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	0	*G09*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	0	*G10*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	3	*G11*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	1	*G12*
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	5	*G13*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	5	*G14*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	5	*G15*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	0	*G16*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	5	*G17*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	0	*G18*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	5	*G19*
EJES presentan DIVISIONES	2	*G20*
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	2	*G21*
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	3	*G22*
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	1	*G23*
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	2	*G24*
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	1	*G25*
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	3	*G26*
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	3	*G27*
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	3	*G28*
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	0	*G29*
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	0	*G30*
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	0	*G31*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	0	*G32*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	0	*G33*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	0	*G34*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	3	*G35*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	3	*G36*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	3	*G37*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*G38*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	5	*G39*

*Activación de las relaciones del esquema de acción **procesos termodinámicos (EA3)** en cada una de las 7 pruebas de la batería de caracterización final de la muestra*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Cf01	0	7	0	(0,0)
Cf02	0	7	0	(0,0)
Cf03	0	7	0	(0,0)
Cf04	82	6	27	(0,27)
Cf05	0	6	0	(0,28)
Cf06	0	5	0	(0,0)
Cf07	0	7	0	(0,0)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

El referencial ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** sirvió para elaborar los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, esquemas que se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen en la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA3, Representación gráfica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos

NIVELES	f_4	f_3		f_2		f_1			-		
		f_{3b}	f_{3a}								
ALUMNOS	**Benito**	**Ana**	**Darío**	**Alfonso**	**Clara**	**Brais**	**Carlos**	**Adela**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✓	✖	✖	✓	✓	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	✓	✖	✖	·	·	·	·	·			
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✖	✖	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	✓	✖	✖	·	·	·	·	·			
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
EJES presentan DIVISIONES	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	✓	✖	·	·	·	·	·	·			
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	✓	✖	✖	·	·	·	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			

DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			

Esquema *EA4*: *Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*

Se presentan aquí los esquemas de acción de ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** que demostraron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización final de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge los ***EA4*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las pruebas de la batería de caracterización final. Se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** están representadas por el símbolo ***E***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4), extraídas de las pruebas de caracterización final

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	44	*E01*
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	44	*E02*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	50	*E03*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	45	*E04*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	39	*E05*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	41	*E06*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	18	*E07*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	47	*E08*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	47	*E09*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	4	*E10*
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	4	*E11*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	0	*E12*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	0	*E13*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	0	*E14*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	0	*E15*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	0	*E16*
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE	0	*E17*

LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS		
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	50	*E18*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	50	*E19*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	37	*E20*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	35	*E21*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	0	*E22*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	18	*E23*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	0	*E24*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	0	*E25*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{\text{reversible}}/T$ (MACROSCÓPICA)	0	*E26*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	0	*E27*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	0	*E28*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{\text{expansión}} = -p \cdot \Delta V$	0	*E29*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{\text{sistema}} = -\Delta E_{\text{entorno}}$	6	*E30*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	12	*E31*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	26	*E32*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	22	*E33*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	0	*E34*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	3	*E35*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	1	*E36*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	22	*E37*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	1	*E38*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	36	*E39*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	1	*E40*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	40	*E41*
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	31	*E42*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	29	*E43*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	1	*E44*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	24	*E45*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	1	*E46*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	36	*E47*
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	1	*E48*
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	36	*E49*
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	18	*E50*
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	16	*E51*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	3	*E52*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	3	*E53*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	3	*E54*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	3	*E55*
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	3	*E56*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	3	*E57*
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	3	*E58*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	16	*E59*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	16	*E60*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	16	*E61*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	8	*E62*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	15	*E63*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	1	*E64*

CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	12	*E65*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	45	*E66*

Activación de las relaciones del esquema de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (EA4) en cada una de las 7 pruebas de la batería de caracterización final de la muestra

ACTIVIDAD	***F***	***A***	***R***	***(min,máx)***
Cf01	136	7	20	(0,20)
Cf02	199	7	33	(0,33)
Cf03	99	7	17	(0,17)
Cf04	111	6	22	(0,20)
Cf05	146	6	26	(0,26)
Cf06	173	5	45	(0,45)
Cf07	193	7	34	(0,33)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química,*** se elaboraron los correspondientes esquemas de acción de los alumnos, que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción EA4, ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	f_4	f_3		f_2			f_1		-		
		f_{3b}	f_{3a}	f_{2b}		f_{2a}	f_{1b}	f_{1a}			
ALUMNOS	**Ana**	**Darío**	**Adela**	**Benito**	**Clara**	**Alfonso**	**Braís**	**Carlos**	**Berta**	**Diana**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la	✓	✓	✓	·	✓	·	·	·			

consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS											
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	·	✓	·	·	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	·	·	·	·	·	·	·	·			
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	💣	✓	✓	✓	✓	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{reversible}/T$ (MACROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{expansión} = -p \cdot \Delta V$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{sistema} = -\Delta E_{entorno}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	✓	💣	✓	✓	✓	✓	·	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	💣	💣	✖	✖	✓	✓	·	✓			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✖	✖	·	✓	✓	✓	·	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	✓	·	·	·	·	·	·	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	✓	·	·	·	·	·	·	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	·	·	·	✓	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	💣	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a	·	·	·	✓	·	·	·	·			

la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA											
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	✓	·	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	✓	·	·	·	·	·	·	·			
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	·	·	·	✓	·	·	·	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	✓	💣	✓	✓	✓	✓	·	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

VI.4.3. Análisis mediante competencias

En este apartado se analizan las competencias que demostraron los alumnos en sus respuestas escritas a las siete pruebas que conformaron la batería de caracterización final de la muestra, ***Cf***. Se evalúan seis competencias (competencia científica, competencia matemática, competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, competencia social y ciudadana, competencia en comunicación lingüística y competencia en aprender a aprender), con especial énfasis en la competencia científica, que se ha desglosado en tres competencias (capacidades) más concretas: identificación de cuestiones científicas, explicación científica de fenómenos y utilización de pruebas científicas, además de las actitudes hacia la Ciencia.

De las manifestaciones escritas que produjeron los estudiantes en sus respuestas a pruebas de caracterización final, se han extraído los elementos de la competencia (unidades de análisis) que vertebran las competencias (capacidades) descritas. A cada elemento de la competencia se le adjudicó una puntuación numérica de acuerdo con los indicadores de la competencia (***IC***s), cuyos valores se obtienen mediante la suma de los valores de los factores de la competencia (***FC***s)

que se presentaron en el ***Volumen A***. La evaluación de los aspectos actitudinales se realizó siguiendo la escala de puntuaciones que se describió en el ***Capítulo III***.

La determinación de los niveles de competencia alcanzados en las distintas pruebas se realizó mediante la comparación de los valores de competencia idiosincrásicos con los dos valores referenciales de la ciencia escolar, VRC_1 y VRC_2, que permiten definir los niveles $NC = NC_1,\ldots,NC_5$. Los resultados de este análisis revelan el aprendizaje que realizaron los alumnos como consecuencia de su interacción con la segunda unidad didáctica ensayada, *Termodinámica Química*, en términos de las competencias que fueron capaces de poner en juego en sus respuestas de manera autónoma (sin ayuda de un experto ni de sus compañeros).

En las tablas que vienen a continuación se recogen los valores medios, aproximados por redondeo a la unidad, para los niveles de las distintas competencias que demostraron los alumnos en las pruebas de caracterización final. Dichos valores se han hallado calculando el promedio estadístico de los niveles de competencia para las 7 pruebas de la batería de caracterización final ***Cf***, en las que los alumnos deben elaborar respuestas escritas a cuestiones de base científica. Las dos últimas columnas de las tablas incluyen el promedio estadístico de los niveles de competencia para el conjunto de la muestra y la desviación típica correspondiente.

Promedio de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en las pruebas de caracterización final

ALUMNO	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**	**Promedio**	**Desviación típica**
Competencia en el conocimiento e interacción con el mundo físico	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,75**	**0,89**
Identificación de cuestiones científicas	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,38**	**1,51**
Reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia	**4**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,63**	**1,30**
Reconocer la base científica de la cuestión (conocimientos de la Ciencia y sobre la Ciencia)	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**4**	**5**	**1**	**2,88**	**2,03**
Utilizar estrategias de búsqueda de información científica, comprenderla y seleccionarla	**4**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,63**	**1,30**
Reconocer los rasgos claves de la investigación científica	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Explicación científica de los fenómenos	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Aplicar (transferir) los conocimientos de la Ciencia	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,25**	**0,89**
Describir y explicar fenómenos científicamente y predecir cambios	**3**	**2**	**1**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,93**
Reconocer descripciones,	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1,75**	**1,04**

explicaciones y predicciones													
Utilización de pruebas científicas	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**4**	**1**	**2,13**	**1,36**
Interpretar datos y pruebas, elaborar y comunicar conclusiones	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,88**	**0,99**
Argumentar en pro y en contra de las conclusiones, e identificar supuestos, pruebas y razonamientos	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1,75**	**1,04**
Reflexionar sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,00**
Actitudes hacia la Ciencia	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,00**
Interés hacia la Ciencia y la actividad científica. Apoyo a la investigación científica. Concepción de Ciencia	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,63**	**0,52**
Sentido de la responsabilidad sobre sí mismo, los recursos y el entorno	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,75**	**0,89**

Según la tabla, alcanzaron un nivel de la competencia científica aceptable cuatro alumnos, que son prácticamente los mismos que habían demostrado un NC_2 (medio-bajo) en la caracterización inicial de la muestra: Ana y Adela (del grupo G_A), Clara y Darío (en principio procedían de G_C y G_D, pero por la ausencia de sus respectivos compañeros pasaron a constituir un nuevo grupo de trabajo); con respecto a ***Ci***, el nivel de competencia de Alfonso cae al mínimo, mientras que Benito casi sube un nivel.

Los resultados de la caracterización final parecen reflejar ciertos rasgos del trabajo cooperativo realizado a lo largo de la fase de intervención:

En la identificación de cuestiones científicas y en la explicación de fenómenos destacan Ana y Darío, que preferían condensar sus ideas en razonamientos concisos y describir lo mínimo posible aquellas características de los sistemas y procesos que no fueran estrictamente imprescindibles para resolver las cuestiones. La explicación científica de los fenómenos no llega al nivel medio para ningún estudiante, a causa de las dificultades en la transferencia de los conocimientos adquiridos a la interpretación de los aspectos energéticos de nuevos hechos y fenómenos. Obsérvese que, después de casi un mes de instrucción, los alumnos siguen teniendo serios problemas para interpretar procesos físicos y químicos sencillos, como los cambios de estado del agua o reacciones que implican sustancias inorgánicas que los alumnos ya estudiaron en cursos pasados.

En la utilización de pruebas científicas toman ventaja los alumnos de G_A, incluido Alfonso. El tándem colaborador del grupo, Ana y Adela, adquiere un nivel medio en dos de las competencias más concretas de la segunda de las competencias (capacidades), a pesar de no contar con la ayuda del profesor. La reflexión sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos sigue sin ser adecuada, resultado esperable teniendo en cuenta los aspectos actitudinales que se pusieron de manifiesto en las fases previa y de intervención.

Las actitudes sólo son aceptables para los seis alumnos que obtuvieron un

NC_2 en las pruebas de caracterización inicial; el resto de la muestra, que se encontraba ya en el nivel NC_1, se mantiene en él.

Promedio de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en las pruebas de caracterización final

ALUMNO	Ana	Alfonso	Braís	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia matemática	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
Identificar situaciones que exigen conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos	**5**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,25**	**1,98**
Utilizar el lenguaje matemático para cuantificar aspectos relacionados con los fenómenos naturales	**5**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,25**	**1,98**
Utilizar técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar expresar datos e ideas	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,38**	**0,52**
Realizar cálculos sobre los fenómenos naturales	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,25**	**1,39**
Realizar representaciones gráficas sobre fenómenos naturales	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,50**	**1,41**

Son cuatro los alumnos alcanzan un nivel medio (NC_3), frente a los cinco de la caracterización inicial. Aunque los aspectos de cálculo no llegan a los mismos resultados que los de utilización del lenguaje matemático, son aceptables para los cuatro alumnos que más trabajo y esfuerzo demostraron en el aula. Las competencias en la realización de representaciones gráficas siguen siendo bajas, y revelan cambios con respecto a la caracterización inicial: Adela, que tenía un nivel medio de competencia, cae al mínimo, y Benito sube espectacularmente.

Promedio de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, que demostraron los alumnos en las pruebas de caracterización final

ALUMNO	Ana	Alfonso	Braís	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en comunicación lingüística	**3**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,50**	**0,93**
Comprender e interpretar mensajes acerca de las Ciencias	**3**	**4**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,75**	**1,49**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos con contenido científico	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**5**	**4**	**1**	**3,13**	**1,46**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la comunicación de ideas (saber decir)	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**3,00**	**1,31**

Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción del conocimiento (saber hacer)	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Saberes actitudinales relacionados con las tareas comunicativas: utilizar el lenguaje de forma razonada y dialogante en la regulación de conductas y emociones	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**4,88**	**0,35**
Competencia en el tratamiento de la información y Competencia digital	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Aplicar las formas específicas del trabajo científico para buscar, recoger, seleccionar la información, procesarla y presentarla	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
Utilizar las TIC para comunicarse, recabar información, visualizar situaciones, obtener y tratar datos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

En ***Cf*** alcanzan un nivel medio de competencia lingüística seis alumnos, es decir, todos salvo los que más obstáculos actitudinales ponen al aprendizaje. Los seis alumnos de nivel medio interpretan mensajes de contenido científico y demuestran haber adquirido en un grado adecuado el vocabulario científico para expresar sus ideas, a pesar de que su expresión sigue siendo pobre para el nivel de 2º de Bachillerato. Ni los ánimos que les intentó infundir Rodrigo, el profesor, ni los alegatos de los profesores de Lengua y Literatura Castellana y Gallega lograron que estos estudiantes ampliaran su vocabulario y cuidaran los aspectos morfológicos y sintácticos (recuérdese que las destrezas de lectoescritura eran deficientes, incluso con respecto a la puntuación de los textos y la ortografía). En general, la sistematización de las descripciones e interpretaciones es mejor que en la caracterización inicial.

Promedio de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en las pruebas de caracterización final

ALUMNO	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**	**Promedio**	**Desviación típica**
Competencia social y ciudadana	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,83**
Comprender y explicar de manera científica problemas de interés social	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,13**	**1,55**
Aplicar el conocimiento sobre debates esenciales para el avance de la Ciencia, para comprender cómo han evolucionado las sociedades y para analizar la sociedad actual	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,13**	**1,55**
Comportarse individualmente según las normas y valores democráticos, al relacionarse con los demás y afrontar los conflictos	**4**	**4**	**3**	**4**	**2**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**3,63**	**0,74**
Cooperar y comprometerse en el trabajo científico y en las relaciones	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,63**	**0,52**

interpersonales													
Competencia en aprender a aprender	**4**	**3**	**3**	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**3,38**	**0,52**
Iniciarse en el aprendizaje y ser capaz de continuarlo de manera autónoma (saber ser)	**5**	**4**	**4**	**5**	**4**	**1**	**4**	**1**	**4**	**5**	**1**	**4,38**	**0,52**
Desenvolverse ante las incertidumbres: tratando de buscar respuestas, admitiendo diversas soluciones ante un mismo problema	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**4,88**	**0,35**
Habilidad para organizar el tiempo de forma efectiva y perseverancia en el aprendizaje	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**

Los datos de la competencia social y ciudadana indican que existe una dicotomización de la muestra: hay tres alumnos que no se presentan voluntariamente a la evaluación de sus conocimientos, y su valor de competencia es el mínimo. En cuanto a Carlos y Brais, en el caso de ***Cf*** se ha considerado que por lo menos hicieron el esfuerzo de presentarse y cubrir algunas de las cuestiones, aunque su actitud fuera claramente pasiva. Los demás estudiantes continúan en el nivel $\boldsymbol{NC_2}$, aceptable, pero medio-bajo, salvo Ana, Adela y Darío.

La competencia en aprender a aprender enriquece con matices la información anterior. Ana, Benito consolidan su nivel $\boldsymbol{NC_4}$, y Adela se mantiene en el nivel intermedio $\boldsymbol{NC_3}$ debido a la inseguridad en sus propias capacidades; en este nivel se encuentran además Alfonso (más autónomo en el trabajo y con mayor autoestima, pero menos constante en el aprendizaje) y Clara, más esforzada en sus estudios pero menos confiada en sí misma y demasiado tímida como para pedir ayuda al profesor e incluso a veces a sus propios compañeros.

Nuevamente, los resultados del análisis por competencias concuerdan con los del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, y los de la fase de intervención y la caracterización final arrojan información concordante: a lo largo de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química, los alumnos construyeron un conocimiento que se puede considerar aceptable, en tanto en cuanto demuestra avances con respecto a la situación inicia; pero es insuficiente para 2º de Bachillerato en cuanto a la movilización del conocimiento de la ciencia escolar para describir e interpretar los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos. La expresión de las ideas es todavía descuidada en general, a pesar de que los alumnos han interiorizado el lenguaje científico en lo esencial, y las actitudes de al menos tres alumnos son totalmente inadecuadas para el desarrollo de un aprendizaje significativo, reflexivo y que genere satisfacción personal y curiosidad por el conocimiento de la Ciencia y sobre la Ciencia.

A falta de la interpretación de los resultados de las pruebas de retención, parece confirmarse que el trabajo en un entorno colaborativo favorece la construcción de nuevas ideas. Esto sucede para los alumnos del grupo $\boldsymbol{G_A}$ y en la

colaboración entre Clara y Darío; y el caso más claro es el de Benito, cuyos resultados mejoran claramente, desde el momento en que entra a trabajar con los otros dos grupos y se aleja de su grupo de origen, G_B, en el que Berta aparece y desaparece intermitentemente, y Brais se resiste a cooperar.

VI.5. Contraste de la $sHT_{3.1}$

A la vista de los resultados obtenidos, podemos afirmar que esta estrategia de obtención de la información ha tenido éxito por dos motivos fundamentales: en primer lugar, porque los alumnos respondieron a las pruebas de caracterización en la misma medida que a las actividades de las secuencias de enseñanza y al examen tradicional (cf. epígrafe correspondiente); en segundo lugar, porque el profesor colaborador ha adoptado con gran interés esta estrategia de recogida de información para la evaluación habitual en sus clases de Ciencias.

A la luz de los resultados de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias que demostraron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de caracterización inicial de la muestra, que son claramente superiores a los esquemas y competencias demostrados en la caracterización inicial y la fase previa a la intervención, se confirma la *Subhipótesis 3.1* tal como se formuló:

> Después de la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes activan esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.
>
> Tras la aplicación de la segunda propuesta en el aula, se verifican progresos significativos en los esquemas de razonamiento y acción y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación anterior a la aplicación de la segunda propuesta didáctica.

VII. Valoración del conocimiento de los estudiantes a medio plazo (retención)

En este capítulo se contrasta la *Subhipótesis de trabajo 3.2* ($sHT_{3.2}$). Para ello, se han evaluado los conocimientos que presentaron suficiente estabilidad al cabo de un cierto tiempo después de la intervención. Se someten a análisis las respuestas los estudiantes a una serie de pruebas que constituyen una batería de retención, y en la que los alumnos manifestaron sus conocimientos dos meses después de la aplicación de la propuesta de enseñanza sobre Termodinámica Química.

Se describen la toma, el tratamiento, la transformación y el análisis de los datos a partir de los cuales se han obtenido los resultados que han permitido contrastar la *Subhipótesis de trabajo 3.2* ($\boldsymbol{sHT_{3.2}}$):

Planteamiento y fundamentación de la $\boldsymbol{sHT3_{.2}}$ (pág. 1135). Se plantea y justifica la segunda de las dos sub-hipótesis en las que se ha operativizado la tercera hipótesis de trabajo de la investigación que se describe.

Aplicación y desarrollo de la batería de retención (pág. 1136). Se detallan las pruebas que constituyen la batería de retención.

Análisis y discusión de los resultados (pág. 1137). En este epígrafe se describen y analizan los resultados de la retención, mediante dos tipos de análisis cualitativo, precedidos por un Análisis *item* a *item* (pág. 1138):

Análisis mediante esquemas de conocimiento (pág. 1158). Se detalla el análisis de los esquema de razonamiento y de los esquemas de acción que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos.

Análisis mediante competencias (pág. 1187). Un análisis de las competencias que demostraron los estudiantes en la resolución de las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas de retención. Estas competencias se reconstruyen a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas por los estudiantes en sus respuestas a las pruebas.

Para estudiar la influencia de la metodología ensayada en la evolución de las formas de pensar y de hacer de los estudiantes, se realizan dos contrastes entre los resultados expuestos en anteriores capítulos y los discutidos en el presente capítulo:

En primer lugar, se contrastan los resultados de la retención con los correspondientes a los conocimientos iniciales (***Capítulos III*** y ***IV***). Este contraste permite comprobar la evolución global del aprendizaje estable que promovió la segunda unidad didáctica. Después, los resultados de la retención se someten a contraste con los conocimientos finales (***Capítulo VI***), y se comprueba cuáles han permanecido estables durante un periodo de tiempo suficientemente prolongado para considerar que son resultado de un aprendizaje significativo.

Resultados del contraste de *los niveles globales g para el esquema de acción EA1*

Niveles *g*	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles *i*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *f*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *r*	Nº alumnos	Alumnos
g_4				f_4	2	Ana Benito	r_4	4	Alfonso Benito Adela Darío
g_3	i_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío	f_3	4	Alfonso Adela Clara Darío	r_3	2	Ana Clara
g_2	i_2 i_1	2	Brais Diana	f_2	1	Carlos	r_2	1	Brais
g_1				f_1	1	Brais	r_1	1	Brais

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de acción EA2

Niveles *g*	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles *i*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *f*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *r*	Nº alumnos	Alumnos
g_4				f_4	1	Darío			
g_3	i_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío	f_3	3	Ana Adela Clara	r_4	1	Darío
g_2	i_2	1	Diana	f_2	2	Alfonso Benito	r_3 r_2	4	Ana Alfonso Benito Clara
g_1	i_{1a}	1	Brais	f_1	2	Brais Carlos	r_1	3	Brais Adela Diana

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de acción EA3

Niveles *g*	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles *i*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *f*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *r*	Nº alumnos	Alumnos
g_5	i_{4a}	1	Adela	f_4	1	Benito			
g_4	i_{3a}	2	Ana Darío	f_3	2	Ana Darío	r_3	3	Alfonso Benito Darío
g_3	i_2	2	Alfonso Clara				r_3	2	Adela Clara
g_2	i_{1a}	2	Benito Diana	f_2	2	Alfonso Clara	r_2	1	Ana
g_1	i_{1b}	1	Brais	f_1	3	Brais Carlos Berta	r_1	2	Brais Diana

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de acción EA4

Niveles	Caracterización inicial	Caracterización final	Batería de retención

g	Niveles *i*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *f*	Nº alumnos	Alumnos	Niveles *r*	Nº alumnos	Alumnos
g_5				f_4	1	Ana			
g_4	i_4 i_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío	f_3	2	Adela Darío			
g_3	i_2	1	Diana	f_2	3	Alfonso Benito Clara	r_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío
g_2				f_1	2	Brais Carlos	r_2	1	Brais
g_1	i_1	1	Brais				r_1	1	Diana

Queda confirmado que se produce un avance significativo en los esquemas de razonamiento y acción de los alumnos desde la caracterización inicial hasta la caracterización final, como consecuencia de la intervención realizada en el aula. Después de dos meses sin trabajar contenidos de Termoquímica y Termodinámica Química en el aula, los niveles de los esquemas caen solamente en caso de ***ER1*** y ***ER3***, y el retroceso se verifica solamente en un nivel *g*, lo que confirma la efectividad de las dos secuencias de enseñanza propuestas en la construcción de esquemas de razonamiento y acción deseables de la ciencia escolar para el conjunto de la muestra.

Contraste de la $sHT_{3.2}$ (pág. 1194). Se establecen las conclusiones derivadas del análisis discutido en el capítulo, que ha permitido la verificación o refutación de la *Subhipótesis de trabajo 3.2* ($sHT_{3.2}$).

VII.1. Planteamiento y fundamentación de la $sHT_{3.2}$

Se puede considerar que los conocimientos conceptuales y procedimentales que se retuvieron a medio plazo son resultado de un aprendizaje significativo. Con el propósito de determinarlos, se diseñó una batería de caracterización a medio plazo, o batería de retención ***Rt*** compuesta por cinco pruebas mediante las que se exploró hasta qué punto permanecían estables al cabo de dos meses los conocimientos que los alumnos habían construido a lo largo de la fase de intervención ***Fi*** (implementación de la unidad didáctica *Termodinámica Química*).

Los resultados del análisis de las respuestas que elaboraron los estudiantes para resolver las cuestiones planteadas en las pruebas de retención, permiten determinar los conocimientos que tenía cada individuo de la muestra dos meses después de la aplicación de la segunda propuesta de enseñanza. Por ello, sirven para contrastar la *subhipótesis de trabajo 3.2* (que se formuló en el ***Capítulo I*** (***Volumen A***). Se trata de la segunda subhipótesis en la que se operativizó la tercera hipótesis de trabajo, que hace referencia a las condiciones finales del conocimiento

de los estudiantes. $sHT_{3.2}$ se enuncia como sigue:

Después de un cierto tiempo desde la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes continúan activando esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Los alumnos continúan demostrando competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Existe una permanencia significativa en los aprendizajes realizados, al cabo de un cierto tiempo desde la intervención.

Considerando que la producción oral y escrita del alumnado revela la incorporación de las relaciones establecidas a lo largo de la intervención y, por tanto, pone de manifiesto la implicación de cada individuo en la evolución de su propio conocimiento, para contrastar la $sHT_{3.2}$ se determinó el conocimiento que demostraron los alumnos en las manifestaciones escritas con las que respondieron las cuestiones planteadas en las cinco pruebas que constituyen la batería de retención. La determinación del conocimiento a medio plazo se realiza mediante los dos métodos de análisis cualitativo cuyos fundamentos se describen en el ***Volumen A***: los esquemas de razonamiento y de acción, y las competencias.

Los enunciados operativos que se derivan de la $sHT_{3.2}$ y se utilizan para ponerla a prueba, se relacionan con los del contraste de la $sHT_{3.1}$:

- Después de la unidad didáctica *Termodinámica Química*, se espera que los alumnos todavía:
  - conozcan el significado de la espontaneidad de reacción en relación con el sentido de evolución de los sistemas químicos;
  - justifiquen la utilidad de la función de estado entropía para el estudio de la evolución de los sistemas químicos;
  - den significado macroscópico y microscópico al concepto de entropía;
  - interpreten los principios segundo y tercero de la Termodinámica;

- comprendan el concepto de energía de Gibbs como función de estado extensiva que proporciona una condición de espontaneidad y equilibrio para los sistemas químicos, y relacionen la variación de la energía de Gibbs con el trabajo útil y con las variaciones de la entalpía y la entropía;

- reconozcan los criterios de espontaneidad de reacción referidos al universo (variación de la entropía del universo) y al sistema (variación de energía de Gibbs del sistema);

- desarrollen estrategias para obtener información sobre la espontaneidad de las reacciones químicas, interpretando datos termodinámicos de acuerdo con razonamientos basados en los conceptos y principios termodinámicos.

- Dos meses después de la realización de las actividades de *Termodinámica Química*, se observa un avance significativo en los conocimientos de los alumnos, en términos de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias científicas, con respecto a los conocimientos que habían demostrado en las pruebas de caracterización inicial (***Capítulo IV***).

Antes de describir e interpretar en profundidad los resultados correspondientes a la retención, en el siguiente apartado se detallan las pautas que se siguieron en la aplicación y desarrollo de la batería ***Rt***.

VII.2. Aplicación y desarrollo de la batería de retención

Las pruebas de la batería de retención se aplicaron dos meses después de la implementación de la segunda unidad didáctica en el aula. Coincidían, por tanto, con el fin de curso para los alumnos de 2º de Bachillerato (mes de mayo), pocos días antes de comenzar las sesiones de preparación intensiva de las pruebas de Selectividad. A las pruebas ***Rt*** se presentaron ocho alumnos: faltaron Carlos, Berta y Débora, de los que no se dispone de datos del aprendizaje a largo plazo (recordemos que tampoco se tenían datos de la caracterización inicial de estos mismos alumnos; de la caracterización final, sí hay datos de Carlos, pero no de Berta ni Débora, como tampoco de Diana).

En el ***Capítulo VI*** ya se ha comentado cómo el profesor, Rodrigo, había decidido que las pruebas escritas diseñadas en esta investigación ofrecían una información fiable y detallada sobre el aprendizaje realizado por los alumnos, y en consecuencia había prescindido del examen tradicional previsto para la unidad didáctica sobre Termodinámica Química, y había basado la calificación en el análisis de las manifestaciones orales y escritas que produjeran los estudiantes a lo largo de la fase de intervención y en la caracterización final. Después de ésta, y para incentivar a los alumnos a esforzarse por obtener una calificación positiva dentro del nuevo protocolo de recogida de información para la evaluación, incluyó la batería de pruebas de retención como parte integrante del "examen de

recuperación" del tercer trimestre de Química (hacia finales de mayo). Dado que en este tipo de exámenes se pueden presentar retrasos en la temporalización, la prueba de retención se realizó un jueves a segunda hora de la mañana, para que la duración del examen pudiera abarcar los 20 minutos del primer recreo y los alumnos tuvieron suficiente tiempo para elaborar respuestas detalladas. Por decisión de Rodrigo, las pruebas de retención se valoraban con un máximo de 2 puntos para la calificación del tercer trimestre de la materia.

No hubo incidencias destacables en la implementación de ***Rt***.

VII.3. Análisis y discusión de los resultados

En este apartado se describen y analizan los resultados que se obtuvieron en la caracterización de retención, al aplicar dos tipos de análisis cualitativo, a cada uno de los cuales se dedica un apartado independiente: un *Análisis mediante esquemas de conocimiento* (pág. 1158) y un *Análisis mediante competencias* (pág. 1187). El primero consistió en la determinación de los esquemas de conocimiento (razonamiento y acción) que activaron los estudiantes para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales en las cinco pruebas de retención, y el segundo es un análisis de las competencias que demostraron los alumnos al resolver las situaciones problemáticas planteadas en las pruebas. Tanto los esquemas de conocimiento como las competencias se reconstruyeron a partir de los razonamientos justificativos y las estrategias de acción utilizadas por los estudiantes en sus respuestas, y estos razonamientos y estrategias se extrajeron directamente de las manifestaciones escritas, que se volcaron en un análisis previo que hemos denominado Análisis *item* a *item* (pág. 1138). En él, se realiza una breve descripción de los perfiles de respuesta que dieron los alumnos a los distintos *items* identificables en las pruebas.

VII.3.1. Análisis *item* a *item*

A continuación se describen los razonamientos justificativos y las estrategias de acción que utilizaron los alumnos en sus respuestas a todas y cada una de las pruebas de caracterización final, y se describen y analizan las manifestaciones escritas más representativas de la muestra.

Vaciadas las respuestas escritas de los estudiantes y organizadas en las categorías que se describen en el ***Volumen A***, los resultados del análisis *item* a *item* para las pruebas de caracterización final de la muestra son los siguientes:

VII.3.1.1. Descripción de resultados de la prueba *Rt01* de retención

Actividad 01: ¿es posible?

Llenamos un vaso con agua del grifo, y guardamos el vaso con agua dentro de un arcón congelador que se programó para una temperatura de −20 °C.

Rt_{01}[1]

A. ¿Qué le va sucediendo al agua del vaso a medida que pasa más y más tiempo en el arcón congelador? Justifica tu respuesta.

B. Explica cómo y por qué variará la entropía del agua desde antes de meterlo en el congelador (estaba a temperatura ambiente), y hasta que pasa 24 h dentro del congelador.

Elabora una gráfica que represente tu explicación.

¿Frente a qué representarías la entropía / variación de entropía: frente al tiempo o frente a la temperatura? Justifica tu elección.

¿Cómo definirías la entropía?

Los resultados del *item Rt01(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Adela	Diana	Clara	Darío
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS								
Consideran como proceso termodinámico (objeto de estudio) la sucesión de estados del sistema agua desde que se introduce el vaso en el congelador, hasta que el agua alcanza la temperatura del congelador (-20 ºC)	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Consideran como proceso termodinámico (objeto de estudio) la solidificación del agua (proceso a T = 253 K)	✓			✓			✓	✓
Elaboran una descripción sobre los cambios en el estado del sistema, en función de alguna variable termodinámica	✓	✖	✓	✓	✓		✓	✓
En su respuesta, describen los cambios que suceden en el sistema en función de la temperatura que alcanza el sistema	✓	✖		✖	✓		✓	✓
Describen el proceso de transición de fase líquido – sólido, y lo relacionan con la disminución de la temperatura del sistema	✓			✖	✓		✓	✓
Consideran que, a temperaturas más bajas de los 0 ºC, se produce la transición de fase líquido – sólido para el agua					✓			
Consideran que, a temperaturas más bajas de l punto de solidificación, se produce la transición de fase líquido – sólido para el agua					✓			✓

Consideran que el agua se va poniendo cada vez más fría				✖				✖
Describen el proceso de transición de fase líquido – sólido, y lo relacionan con un aumento de la temperatura del sistema		✖						
En su respuesta, describen los cambios que suceden en el sistema en función de la variación de volumen del sistema			✓					
Describen el proceso de transición de fase líquido – sólido, y lo relacionan con el aumento de volumen del sistema			✓					
En su respuesta, describen los cambios que suceden en el sistema en función de la variación de entropía del sistema	✓	✓						
Describen el proceso de transición de fase líquido – sólido, y lo relacionan con la variación de la entropía del sistema	✓	✓						
Describen el proceso de transición de fase líquido – sólido, y lo relacionan con la disminución de la entropía del sistema	✓							
En su respuesta, describen los cambios que suceden en el sistema en función del orden termodinámico que alcanza el sistema	✓			✓				
Describen el proceso de transición de fase líquido – sólido, y lo relacionan con el aumento en el orden termodinámico del sistema	✓			✓				
En su respuesta, describen los cambios que suceden en el sistema en función del tiempo que transcurre el agua en el congelador				✓	✓			✓
Elaboran una definición de la variable entropía	✓	✖	✓	✓	✖		✖	✓
Definen la entropía como un índice o una variable de medida, que indica el desorden termodinámico del sistema				✓				✓
Definen la entropía como un índice o una variable de medida, que indica el orden termodinámico de la materia			✖					
Definen la entropía como el grado de desorden termodinámico del sistema	✓							
Definen la entropía como el desorden termodinámico de una sustancia					✖			
Definen la entropía como el orden atómico-molecular del sistema		✖						
Definen la entropía como la variación de energía del sistema							✖	
Realizan algún tipo de representación gráfica sobre la variación de la entropía del sistema	✓	✖		✓	✖		✖	✓
La representación gráfica muestra una tendencia de la dependencia entropía – temperatura o entropía – tiempo	✓	✓		✓	✖			✓
La representación gráfica tiene el perfil de un diagrama entálpico							✖	
Representan la variación de la entropía del sistema en función de la temperatura del sistema		✓			✓			
Establecen una relación directa entre la temperatura del sistema y la entropía del sistema		✖		✓	✖			
Establecen una relación inversa entre la temperatura del sistema y la entropía del sistema		✖			✖			
Representan la variación de la entropía del sistema en función del tiempo	✓			✖		✖	✖	✓
El concepto de "tiempo" que utilizan parece implicar el de "avance del proceso"	✓						✓	✓
Proponen representar la variación de la entropía del sistema en función del tiempo y de la temperatura del sistema				✖				
RELACIONES DESCRIPTIVAS								
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS/INTERPRETATIVOS								
Relaciones macroscópicas								

Relaciones sobre el sistema y el entorno								
Identifican un sistema termodinámico	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Identifican como sistema termodinámico el agua dentro del vaso	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Explicitan la composición química inicial del sistema (agua)	✓	✓	✓	✓	✓		✗	✓
Explicitan la composición química final del sistema (agua)	✓	✓	✓	✓	✓		✗	✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado inicial (agua líquida)	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Describen la composición en fases del sistema en su estado final (agua sólida – hielo)	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Manifiestan algún tipo de confusión entre el sistema termodinámico y el proceso que éste sufre								✗
Relaciones sobre las variables termodinámicas								
Reconocen la variable temperatura como propiedad del sistema termodinámico	✓	✓		✓	✗		✓	✓
Reconocen la variable temperatura como una de las condiciones de reacción	✓	✓		✓	✗		✓	✓
Describen algún valor concreto que adopta la variable temperatura durante el proceso termodinámico	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Hacen referencia a la temperatura inicial del sistema (temperatura ambiente, 25 º C, 298 K)					✓			
Hacen referencia a la temperatura final del sistema (temperatura ambiente, -20 º C, 253 K)					✓			
Hacen referencia a la temperatura de solidificación del agua a presión atmosférica (0 º C, 273 K)					✓			✓
Utilizan la escala Celsius para aportar el valor numérico a la temperatura de solidificación del agua					✓			
No utilizan ninguna escala de temperatura para aportar el valor numérico a la temperatura de solidificación del agua								✗
Reconocen la variable volumen como propiedad del sistema termodinámico			✓					
Reconocen la variable composición en fases como propiedad del sistema termodinámico	✓		✓		✓		✓	✓
Reconocen la variable composición química como propiedad del sistema termodinámico						✓		
Relacionan las variaciones de las variables termodinámicas con el tiempo	✓	✓		✓	✓	✓	✗	✗
Reconocen el tiempo como una variable física que siempre crece en su valor	✓			✗				✓
Consideran que el tiempo podría detenerse				✗				
Consideran que el valor de la variable entropía debe representarse frente al tiempo, porque la temperatura permanece constante durante el cambio de estado del agua	✗			✗				✗
Consideran que el avance del proceso es una variable termodinámica del sistema (permite caracterizar al sistema)	✓			✓				✓
Consideran que el tiempo es una variable termodinámica del sistema (permite caracterizar al sistema)							✗	
Consideran que la entropía de un sistema no depende del intervalo de tiempo en que transcurra el suceso (independencia entre termodinámica y cinética)		✓			✓			
Relaciones sobre el proceso termodinámico								
Identifican un proceso termodinámico	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Identifican como proceso termodinámico como la sucesión de estados del sistema agua desde que se introduce el vaso en el congelador, hasta que el agua alcanza la temperatura del congelador (-20 ºC)	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Identifican el proceso de solidificación/congelación del agua como proceso termodinámico	✓			✓				✓

Describen el tipo de proceso que tiene lugar (desde el punto de vista macroscópico): cambio de estado	✓		✓		✓		✖	✓
Describen la variación en el nivel de energía del sistema debido al cambio de estado							✖	
Describen el tipo de proceso que tiene lugar (desde el punto de vista microscópico): cambio de estado	✓	✓		✓	✓		✖	
Consideran que la moléculas de agua se comprimen durante el cambio de estado							✖	
Describen los estados inicial y final de la reacción "cambio de estado": reactivos – productos							✖	
Consideran que el proceso de solidificación propuesto es un proceso químico							✖	✖
Recogen algún tipo de observación característica del proceso	✓		✓	✓				✓
Consideran que el cambio de estado es completo (cuantitativo)	✓		✓		✓		✓	✓
Consideran que el cambio de fase es progresivo	✓			✓	✓			✓
Consideran que la disminución de la temperatura del sistema es progresiva	✓	✖		✓	✓		✓	✖
Consideran que, durante el cambio de estado, la temperatura del sistema permanece constante	✓			✓				✓
Consideran que el aumento de la temperatura del sistema es progresivo		✖						
Consideran que se producen variaciones en la temperatura del sistema durante el proceso observado	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Consideran que se produce una disminución de la temperatura del sistema "antes del cambio de estado", esto es, en el intervalo de temperatura entre $T_{ambiente}$ y T = 273 K	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Consideran la temperatura del sistema permanece constante durante el cambio de estado	✓			✓				✓
Relacionan el proceso de cambio de estado con la disminución la disminución l **de la temperatura del sistema durante el proceso**	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Relacionan los procesos con el intervalo de temperatura en el que se producen	✓			✓	✓			✓
Relacionan la temperatura de solidificación del agua con el cambio en el estado termodinámico del sistema	✓			✓	✓			✓
Consideran que el proceso tiene lugar a altas temperaturas		✖						
Consideran que se producen variaciones en el volumen del sistema durante el proceso			✓					
Consideran que se producen variaciones en la composición química del sistema durante el proceso							✖	
Consideran que se producen variaciones en la composición en fases del sistema durante el proceso de cambio de estado	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que el proceso de cambio de estado es viable en las condiciones propuestas	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que, durante el cambio de estado, la entropía varía (es una variable continua),pero debido al tiempo, puesto que no puede variar a temperatura constante	✖			✖				✖
Consideran que, para cada valor de temperatura, el sistema presenta un único valor de entropía		✖			✖			
Consideran que el cambio de estado es no espontáneo a temperaturas superiores a la solidificación del agua	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que el cambio de estado se hace espontáneo a la temperatura de solidificación del agua	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que es espontáneo todo proceso que sucede en las condiciones descritas	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Consideran que es espontáneo todo proceso que sucede "de forma natural" (sin intervención externa)	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Condicionan la espontaneidad del proceso a las condiciones de temperatura en las que se encuentra el sistema (en las que tiene lugar el cambio de estado)	✓		✓	✓	✓		✓	✓

Relaciones sobre los estados del sistema								
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...) para el proceso propuesto					✓		✗	✓
Identifican diferentes estados del sistema (inicial, final...) para el proceso de cambio de estado del agua (solidificación)	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Identifican el estado inicial del sistema para el proceso propuesto: el agua se encuentra a temperatura ambiente, dentro de congelador	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Identifican el estado inicial del sistema para el proceso propuesto: el agua se encuentra líquida a la temperatura de 0 ºC, dentro de congelador	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Identifican los estados inicial y final del sistema para el proceso propuesto: reactivos y productos							✗	
Explicitan el concepto de estado termodinámico	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Explicitan el concepto de estado de agregación	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Describen el cambio en el estado del sistema durante el proceso propuesto	✓		✓	✓	✓		✗	✓
Justifican algunos cambios del sistema basándose en los cambios en la temperatura del sistema	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Justifican el cambio de estado que sufre el sistema, basándose en el descenso de la temperatura	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Justifican la disminución en el *desorden* del sistema basándose en el descenso de la temperatura del sistema	✓	✓	✓	✓				
Justifican algunos cambios del sistema basándose en el transcurso del tiempo	✓			✓				✓
Justifican el cambio de estado del agua, basándose en el transcurso del tiempo, puesto que la temperatura permanece constante durante el cambio de estado	✓			✓				✓
Justifican algunos cambios del sistema basándose en los cambios en el estado de agregación que sufren las distintas sustancias químicas que componen el sistema	✓		✓		✓		✗	✓
Justifican el aumento de volumen del sistema basándose en el proceso de solidificación			✓					
Justifican la disminución en el *desorden* del sistema basándose en la aparición de sustancias en una fase más condensada (sólida)	✓				✓			✓
Justifican la liberación de energía por parte del sistema (posiblemente referido a la disminución del nivel de energía del sistema) basándose en el proceso de solidificación							✗	
Justifican algunos cambios del sistema basándose en los cambios producidos en el desorden termodinámico del sistema	✓	✗		✓	✓			✓
Justifican la disminución de entropía del sistema basándose en la disminución del *desorden* del sistema	✓	✓		✓	✓			✓
Justifican la disminución de entropía del sistema basándose en la variación en el orden del sistema, debido a las altas temperaturas		✗						
Relaciones sobre las interacciones en las que se involucra el sistema								
Manifiestan que existen diferencias de temperatura entre el sistema y el entorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aluden a la acción de calentarse y/o enfriarse (ponerse frío) el sistema				✗				✗
Explicitan la existencia de un "contenido energético" intrínseco al sistema (entropía)							✓	
Justifican el hecho de que el proceso de cambio de estado tenga lugar en el sistema	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Consideran que el cambio de estado se debe a que las moléculas del sistema, a bajas temperaturas, se ordenan	✓	✗		✓	✓		✗	
Consideran que el cambio de estado se debe a que las moléculas del sistema, a bajas temperaturas, se comprimen							✗	

Consideran que se necesita tiempo para que el sistema cambie de estado, a una temperatura constante	✓			✓				✓
Consideran que es la temperatura la que hace cambiar a las moléculas, no el tiempo		✓						
No justifican el mecanismo por el cual se inicia el proceso de reacción		✓	✗			✗		✓
Relaciones sobre el fenómeno								
Recogen algún tipo de observación característica del proceso propuesto	✓		✓	✓	✓		✗	✓
Justifican su predicción sobre el valor de la variación de entropía del sistema, basándose en la comparación entre el desorden termodinámico del sistema en los estados inicial y final	✓	✗		✓	✓			✓
Predicen que la entropía del sistema disminuirá, puesto que el sistema se encuentra en condiciones de altas temperaturas, en las que el orden de las partículas es menor		✗						
Predicen que la entropía del sistema disminuirá a medida que desciende la temperatura, puesto que se produce una disminución en el *desorden* termodinámico del sistema	✓			✓	✓			✓
El descenso de la entropía, debido la disminución en el *desorden* termodinámico del sistema, se debe al cambio de estado (el estado sólido es menos desordenado que el estado líquido)					✓			✓
El descenso de la entropía, debido la disminución en el *desorden* termodinámico del sistema, se debe al cambio en la disposición de las partículas del sistema (lo cual se relaciona, a su vez, con el cambio de estado)	✓			✓				
El descenso de la temperatura del sistema hace que las partículas del sistema se encuentren más *desordenadas*	✓			✓				
El descenso de la temperatura del sistema hace que las partículas del sistema se encuentren más juntas entre ellas	✓			✓				
Justifican el hecho de que se produzca el fenómeno de solidificación	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Recogen observaciones sobre las variaciones del temperatura del sistema	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Las variaciones de temperatura del sistema se deben al contacto con el entorno (que se encuentra a menor temperatura): utilización del Principio Cero de la Termodinámica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Apelan al concepto de entropía	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓
Consideran la entropía una propiedad del sistema termodinámico (variable termodinámica)	✓	✓	✓	✓	✓			✓
Consideran la entropía una propiedad del proceso termodinámico							✗	
Consideran la entropía una propiedad de la materia			✗					
Consideran la entropía una propiedad de las sustancias químicas					✗			
Asocian un valor de entropía a los diferentes estados del sistema (consideran la entropía una función de estado del sistema)	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Explicitan el signo de los valores de entropía del sistema (siempre positivo)	✓	✓		✓	✓		✗	✓
Consideran que la entropía puede tomar valores negativos								
Asocian una variación de entropía al proceso propuesto	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Asocian un valor de entropía a cada uno de los estados conocidos (inicial y final) del sistema	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Asocian un valor cualitativo (alto, bajo...) para la entropía a cada uno de los estados conocidos (inicial y final) del sistema	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Asocian un valor *relativo a otro estado del sistema* (mayor o menor que en otro estado) para la entropía a cada uno de los estados conocidos (inicial y final) del	✓	✓			✓			✓

sistema								
Hacen referencia al "cero de entropías"	✓			✓				✓
Justifican su respuesta sobre el signo de la ΔS asociada al sistema a lo largo del proceso	✓	✓		✓	✓		✖	✓
La justificación sobre la variación de entropía asignada al sistema, se basa en el concepto de orden/desorden termodinámico	✓	✖		✓	✓			✓
Aportan el significado del concepto de orden/desorden termodinámico	✓	✖		✓				
Relacionan el concepto de orden/desorden termodinámico con la distancia entre las partículas del sistema	✓							
Relacionan el concepto de orden/desorden termodinámico con la disposición relativa (más o menos simétrica) de las partículas del sistema		✖		✓				
La justificación sobre la variación de entropía asignada al sistema, se basa en el concepto de temperatura		✖						
Consideran que la entropía disminuye a medida que aumenta la temperatura		✖						
La justificación sobre la variación de entropía asignada al sistema, se basa en el concepto de energía							✖	
Consideran que la entropía es/representa la variación de la energía asociada a un proceso							✖	
Construyen una interpretación macroscópica del concepto entropía							✖	
Relacionan la entropía, asociada al proceso termodinámico, con la variación de energía que sufre el sistema							✖	
Relacionan la entropía, asociada al proceso termodinámico, con la temperatura del proceso	✓	✖		✓	✖			✓
Establecen una relación directa entre la entropía del sistema y la temperatura: a medida que disminuye la temperatura, disminuye la entropía	✓			✓	✓			
Establecen una relación inversa entre la temperatura y la entropía		✖			✖			
Construyen una interpretación microscópica del concepto entropía	✓	✓		✓	✓			✓
Relacionan la variación de entropía, asociada al proceso termodinámico, con el mayor orden/desorden termodinámico del sistema	✓	✖	✖	✓	✓			✓
Relacionan la variación de entropía, asociada al proceso termodinámico, con el cambio que sufre el sistema en su desorden termodinámico	✓			✓	✓			✓
Aportan algún significado sobre el concepto de desorden termodinámico del sistema	✓	✖		✓				
Relacionan el concepto de desorden termodinámico del sistema con la temperatura del sistema	✓	✓			✖			
Relacionan el concepto de desorden termodinámico del sistema con el intervalo de tiempo en el que sucede el proceso				✓	✖			
Relacionan el concepto de desorden termodinámico del sistema con el estado de agregación del sistema	✓			✓	✓			✓
Relacionan el concepto de desorden termodinámico del sistema con la posibilidad de que cambie la estructura atómico-molecular del sistema	✓	✓	✓	✓				
Relacionan la entropía, asociada al proceso termodinámico, con el nivel de energía del sistema							✖	
Relacionan la variable entropía, asociada al proceso termodinámico, con la estructura atómico-molecular de las sustancias químicas	✓	✓		✓				
Consideran que la entropía del sistema depende de la distancia (media) entre los átomos/iones de las sustancias que componen el sistema	✓	✓						
Relacionan la entropía de un sistema químico con la disposición espacial de los átomos/iones de las sustancias que componen el sistema		✓		✓				

Relacionan la temperatura con la disposición espacial de las partículas	✓	✓						
Relacionan la temperatura con el tamaño de las partículas							✗	
Relacionan la entropía con la naturaleza / composición elemental de las sustancias propuestas					✓			
Relacionan la variable entropía con la composición en fases de las sustancias implicadas	✓			✓	✓			✓
Atribuyen un signo a la variación de entropía asociada al proceso termodinámico propuesto	✗	✗		✓	✗		✗	✓
Establecen un valor semi-cuantitativo (mayo, menor que cero...) para la variación de entropía asociada al proceso termodinámico propuesto							✓	
Consideran que la variación de la entropía del sistema es paulatina o gradual	✓	✓		✓	✓	✓	✗	✓
Justifican su respuesta sobre la variación de entropía asociada al proceso propuesto	✓	✗		✓	✓			✓
Plantean una justificación macroscópica para sus predicciones sobre el valor de la variación de entropía		✗						
Basan su justificación en la variación de la temperatura del sistema durante el proceso		✗						
Basan su justificación en la ganancia/pérdida de desorden termodinámico del sistema durante el proceso	✓	✗		✓	✓			✓
Aluden a una relación entre el estado de agregación de las sustancias implicada en cada proceso, y el desorden termodinámico del sistema	✓	✗		✓	✓			✓
Basan su justificación en el "cambo de estado" del sistema durante el proceso								
Plantean una justificación microscópica para sus predicciones sobre el valor de la variación de entropía	✓	✗		✓	✓			✓
Consideran que la temperatura hace "cambiar" a las partículas, pero no describe cómo ni por qué mecanismo		✗						
Aluden al modelo de partículas para describir la variación de la entropía del sistema	✓	✗		✓	✓			✓
No justifican sus predicciones sobre el valor de la variación de entropía							✗	
Relaciones microscópicas								
Apelan a algún concepto del dominio microscópico de la materia	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Apelan al concepto de reacción química							✗	
Apelan al concepto de "avance del proceso"	✓			✓				✓
Reconocen que el proceso de cambio de estado se produce en un intervalo de tiempo	✓			✓				✓
Apelan al concepto de partícula				✓				
Apelan al concepto de átomo	✓							
Apelan al concepto de molécula		✓					✓	
Relaciones sobre el fenómeno – proceso								
Apelan al concepto de cambio de estado	✓		✓	✓	✓		✓	✓
Utilizan el término "congelación" para describir el cambio de estado				✓	✓			
Utilizan el término "solidificación" para describir el cambio de estado			✓					✓
Utilizan el modelo de partículas para describir el proceso de cambio de estado que tiene lugar en el sistema	✓	✓		✓			✗	
Consideran que el proceso de cambio de estado implica un cambio en las distancias entre las partículas del sistema	✓	✓						
Consideran que el proceso de cambio de estado implica un cambio en la disposición espacial relativa delas partículas del sistema		✓		✓				
Consideran que la solidificación del agua es una reacción química							✗	

Justifican el hecho de que en el sistema tenga lugar el cambio de estado	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Justifican que en el sistema se produzca el proceso de solidificación, debido a la disminución de temperatura en el sistema	✓	✖		✓	✓		✖	
Con la disminución de la temperatura, las partículas del sistema se ordenan	✓	✖		✓	✓		✖	
Explicitan el concepto de temperatura de solidificación					✓			
Explicitan el concepto de punto de solidificación								✓
Manifiestan que el proceso de cambio de estado implica la compresión de las partículas del sistema							✖	
Relacionan el proceso de solidificación con sus observaciones sobre la variación de la temperatura del sistema	✓			✓				✓
Consideran que, durante le proceso de cambio de estado, la temperatura del sistema no varía	✓			✓				✓
Consideran que, durante le proceso de cambio de estado, la temperatura del sistema varía		✖			✖			
Consideran que el proceso de solidificación se produce en condiciones de altas temperaturas		✖						

VII.3.1.2. Descripción de resultados de la prueba *Rt02* de retención

Actividad 02: la combustión del papel

El proceso de combustión de la celulosa (componente fundamental del papel) presenta un valor negativo de la variación de energía de Gibbs en las condiciones de temperatura ambiente (20 °C) y a presión de 1 atm.

Rt_{02}[1]

A. ¿Cómo consideras que son la variación de entalpía y la variación de entropía para el proceso de combustión del papel: positivos, negativos, iguales a cero, grandes o pequeños en valor absoluto...? Justifica tus respuestas.

Rt_{02}[2]

B. ¿Consideras que la combustión del papel es un proceso espontáneo en las condiciones descritas? Justifica tu respuesta, indicando qué entiendes por "espontáneo".

Si consideras que se trata de un proceso no espontáneo, indica qué condición(es) o factores podrías modificar para hacerlo espontáneo, y por qué.

Los resultados del *item Rt02(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO							

ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS							
Comienza presuponiendo que la combustión del papel es un proceso espontáneo ($\Delta G < 0$)					✓		
Consideran que la variación de entalpía asociada a la combustión del papel es negativa	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Consideran que la variación de entropía asociada a la combustión del papel es positiva	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Consideran que la variación de entalpía asociada a la combustión del papel es grande en valor absoluto				✓			
Consideran que la variación de entalpía asociada a la combustión del papel es pequeña en valor absoluto				✓			✓
Consideran que la variación de entropía asociada a la combustión del papel es grande en valor absoluto				✓			✓
Reconocen implícitamente el sistema reaccionante	✓	✓					
Reconoce explícitamente el sistema termodinámico: el papel				✓			
La entalpía es negativa			✓				
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO							
Relaciones macroscópicas							
Al describir la reacción de combustión, no tienen en cuenta la carbonización del papel				✓			
No describe las variación de la entalpía para el proceso propuesto					✓		✓
No describe las variación de la entropía para el proceso propuesto					✓		✓
Considera que este proceso es espontáneo a cualquier temperatura					✓		
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS							
Relaciones macroscópicas							
La variación de entalpía de la reacción es negativa porque la reacción es exotérmica	✓	✓					✓
La variación de entalpía de la reacción es negativa porque se libera energía al medio				✓		✓	
La variación de entropía de la reacción es positiva porque la reacción implica un aumento del desorden del sistema	✓	✓		✓		✓	
Menciona transferencias de energía por el proceso de calor				✓			
El aumento en el desorden del sistema se debe a un proceso de transición de fase sólido → gas				✓			
La variación de entalpía es muy grande en valor absoluto debido a que el proceso es muy brusco				✓			
No justifica las variaciones de entalpía y entropía que predice para este proceso					✓		

Los resultados del *item Rt02(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	**Ana**	**Alfonso**	**Adela**	**Clara**	**Darío**
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO					
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS					
Espontáneo es todo proceso que sucede a temperatura ambiente	✓				
Espontáneo es todo proceso que libera energía			✓		
Espontáneo es todo proceso que no requiere de una intervención externa				✓	
Espontáneo es todo proceso que no requiere de aportes energéticos externos					✓
No define qué es un proceso espontáneo		✓			
La combustión del papel es un proceso espontáneo	✓				
La combustión del papel es un proceso no espontáneo				✓	✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO					
Relaciones macroscópicas					
Un proceso es espontáneo cuando la variación de la energía de Gibbs asociada al proceso es negativa	✓				
Un proceso es espontáneo cuando la variación de la energía de Gibbs asociada al proceso es positiva					✓

Proponen algún tipo de modificación en las condiciones del sistema para lograr que el proceso sea espontáneo					✓
Proponen variar la *T*					✓
Proponen variar la *p*					✓
Relaciones microscópicas					
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS					
Relaciones macroscópicas					
Decide la espontaneidad del proceso propuesto en base al criterio ΔG	✓				
Descide la espontaneidad del proceso propuesto en base a los valores de ΔH y ΔS del proceso (memorización de la tabla de casos)		✓			
Decide la espontaneidad del proceso basándose en la necesidad de intervenir activamente sobre el sistema				✓	
Justifica la espontaneidad del proceso basándose en que en esas condiciones, los valores de ΔH y ΔS del proceso son favorables a la espontaneidad		✓			

VII.3.1.3. Descripción de resultados de la prueba *Rt03* de retención

Actividad 03: la ebullición del agua

En la tabla que viene a continuación se recogen los datos de variación de entalpía de formación estándar, y de entropía estándar, para el agua en estado líquido y gaseoso.

Agua en estado...	ΔH^0_f (kJ/mol)	S^0 (J/mol·K)
Líquido	-285,8	+69,9
Gaseoso	-241,8	+188,7

Rt03[1]

A. ¿Por qué son negativos los valores de ΔH^0_f que vinen en la tabla? Justifica tu respuesta.

.....

B. Predí el valor (aproximado) y el signo de la ΔH^0_f del agua en estado sólido, y justifica tu elección.

Rt03[2]

C. ¿Por qué son positivos los valores de entropía que vienen en la tabla?

.....

D. ¿A qué se debe que la entropía del agua líquida sea menor, en valor absoluto, que la de la entropía del agua en estado gaseoso?

.....

E. Predí un valor (aproximado) y el signo de la entropía del agua en estado sólido, y justifica tu elección.

F. ¿En qué condiciones será espontánea el cambio de estado líquido-gas del agua? Razona tu respuesta.

G. ¿Coinciden tus observaciones personales sobre este proceso, con el resultado de la predicción de espontaneidad que ofrece la Termodinámica? ¿A que crees que se debe esta coincidencia / no coincidencia?

Los resultados del *item Rt03(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
Consideran que son negativos los valores de ΔH^o_f asociados a los procesos propuestos, porque las ΔH^o_f son pequeñas en valor absoluto	✓					
Consideran que son negativos los valores de ΔH^o_f asociados a los procesos propuestos, porque estos procesos son exotérmicos		✓				✓
Consideran que son negativos los valores de ΔH^o_f asociados a los procesos propuestos, porque estos procesos requieren la aplicación de energía			✓			
Consideran que son negativos los valores de ΔH^o_f asociados a los procesos propuestos, porque estos procesos liberan energía				✓	✓	
Consideran que son positivos los valores de S^o_f asociados al agua en los estados líquido y gaseoso, porque ambos sistemas tienen mucho desorden	✓					
Consideran que son positivos los valores de S^o_f asociados, porque se produce un mayor desorden en sus moléculas		✓				
No justifica el valor de S^o_f asociados al agua en los estados líquido y gaseoso				✓		
Consideran que son positivos los valores de S^o_f asociados al agua en los estados líquido y gaseoso, debido al desorden de sus partículas			✓		✓	
Consideran que son positivos los valores de S^o_f asociados al agua en los estados líquido y gaseoso, debido que prácticamente ninguna sustancia está ordenada al 100%						✓
Explicitan que los procesos de formación de agua a partir de sus elementos son reacciones químicas	✓	✓				✓
Explicitan que los procesos de formación de agua a partir de sus elementos son proceso de transición de fase			✓	✓	✓	
Cuando nombra la entropía molar, realmente se refiere a la variación de entropía	✓					
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Proceso exotérmico es aquél en el cual se libera energía		✓				
Consideran que estos procesos se producirán a cualquier temperatura				✓		
Adjudican un valor de variación de entalpía al estado sólido del agua	✓					
La entropía mide el nivel de desorden						✓
Los proceso espontáneos verifican $\Delta G > 0$				✓		
Establecen una relación de dependencia inversa entre el valor de la entropía de un sistema y la variación de entalpía de un proceso				✓		
Realizan un dibujo aclarativo sobre sus explicaciones						✓
Relaciones microscópicas						
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						

Justifican el signo negativo y el pequeño valor absoluto que predicen para ΔH^o_f, basándose en que la ΔH^o_f asociada a la formación del agua sólida debe ser menor que las formaciones del agua líquida y del agua gaseosa	✓					
Justifican el signo positivo que predicen para ΔH^o_f, basándose en el hecho de que para solidificar agua se consumirá energía, en lugar de liberarse energía		✓				✓
Justifican el signo negativo y el gran valor absoluto que predicen para ΔH^o_f, basándose en que para solidificar agua hay que aportar energía al sistema			✓			
Justifican el signo negativo y el gran valor absoluto que predicen para ΔH^o_f, basándose en que la ΔH^o_f asociada a la formación del agua sólida debe liberar más energía que las formaciones del agua líquida y del agua gaseosa						✓
Justifican el signo positivo que predicen para la ΔH^o_f asociada a la formación del agua sólida, basándose en una relación de proporcionalidad entre los valores de ΔH^o_f asociados a cada uno de las tres reacciones de formación	✓			✓		
En estado gaseoso, el agua presenta mayor valor de entropía molar que en estado líquido, porque tiene menor orden					✓	
Justifican el mayor valor de la entropía molar del agua en fase gas, con respecto a la del agua en fase líquida, basándose en que las partículas presentan diferente disposición en ambas fases	✓	✓	✓		✓	
Las partículas, en la fase gas, están más separadas (distancia interatómica)	✓					
Las partículas, en la fase gas, están más desordenadas	✓	✓	✓			
La estructura molecular del agua, en la fase gas, es más desordenada					✓	
Justifican el mayor valor de la entropía molar del agua en fase gas, con respecto a la del agua en fase líquida, basándose en el diferente grado de desorden de ambos estados de agregación						✓
Justifican el mayor valor de la entropía molar del agua en fase gas, con respecto a la del agua en fase líquida, basándose en la mayor cantidad de energía liberada en la transición de fase que sufre, a temperatura ambiente, el agua en estado líquido				✓		
Justifican el signo negativo que predicen para la S^o molar del agua sólida (realmente, ΔS^o), basándose en que, como la fase sólida es la más ordenada, la transición a esta fase tendrá una ΔS^o negativa	✓	✓				
Justifican el signo negativo que predicen para la S^o molar del agua sólida, basándose en que el orden del estado sólido es significativamente menor que el de los estados líquido y gaseoso					✓	
Justifican el signo positivo que predicen para la S^o molar del agua sólida (realmente, ΔS^o), basándose en que el agua, en estado sólido, tiene las partículas más juntas y ordenadas			✓	✓		
Justifican el signo positivo que predicen para la S^o molar del agua sólida, basándose en una relación de proporcionalidad entre los valores de S^o del agua en cada uno de los tres estados de agregación						
Justifican el signo positivo y el valor absoluto cercano al cero, que predicen para la S^o molar del agua sólida, basándose en que el desorden del estado será muy pequeño, pero no total (del 100%)						✓
INFERENCIAS Y PREDICCIONES						
De carácter macroscópico						
Predicen un valor ΔH^o_f = -197,8 kJ/mol para la reacción de formación del agua sólida	✓					
Predicen un valor $\Delta H^o_f > 0$ para la reacción de formación del agua sólida		✓				✓
Predicen un valor ΔH^o_f = -320 (kJ/mol) para la formación del agua sólida (transición de fase)			✓			
Predicen un valor $\Delta H^o_f <$ (-285,8) kJ/mol para la formación del agua sólida				✓		✓
Predicen un valor ΔH^o_f = -197 kJ/mol para la formación del agua sólida				✓		✓
Predicen un valor S^o = -48,9 J/mol·K para el agua en fase sólida	✓					
Predicen un valor S^o = -49 (J/mol·K) para el agua en fase sólida					✓	
Predicen un valor $S^o < 0$ para el agua en fase sólida		✓				
Predicen un valor S^o = +35 (J/mol·K) para el agua en fase sólida			✓			
Predicen un valor S^o = +306,5 J/mol para el agua en fase sólida				✓		
Predicen un valor positivo tal que $S^o \cong 0$ (J/mol·K) para el agua en fase sólida				✓		✓

Los resultados del *item Rt03(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Clara	Darío

RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO				
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS				
La transición de fase líquido-gas del agua es espontánea en condiciones de altas temperaturas	✓			
La transición de fase líquido-gas del agua es espontánea en condiciones de moderadas-altas temperaturas			✓	
La transición de fase líquido-gas del agua es espontánea a temperaturas superiores a los 100 ºC		✓		✓
La transición de fase líquido-gas del agua es no espontánea a temperatura ambiente	✓			
La transición de fase líquido-gas del agua es no espontánea a bajas temperaturas	✓			
La transición de fase líquido-gas del agua es espontánea a temperaturas menores de 100 ºC				✓
La espontaneidad depende de la temperatura	✓			✓
La espontaneidad depende de la temperatura del entorno		✓		
Explicita el concepto de temperatura de ebullición		✓		
Explicita el concepto de punto de ebullición				✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO				
Relaciones macroscópicas				
Consideran que la transición de fase líquido-gas es la evaporación del líquido	✓		✓	
Consideran que la transición de fase líquido-gas es la ebullición del agua		✓		✓
Consideran que la evaporación del agua sólo se produce a altas temperaturas	✓			
Consideran que la evaporación del agua se produce a temperatura moderadas o altas			✓	
Consideran que la ebullición puede tener lugar a temperaturas menores de los 100 ºC				✓
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS				
Relaciones macroscópicas				
El proceso propuesto sólo es espontáneo en las condiciones en las que se observa (produce) la evaporación del agua líquida	✓			
El proceso propuesto sólo es observable en las condiciones en las que se observa (produce) la ebullición del agua líquida		✓		
La Termodinámica establece que una reacción con entalpía negativa y entropía positiva es espontánea siempre	✓			
Justifica la concordancia entre sus observaciones y la predicción termodinámica en el hecho de que los cambios espontáneos son universales y normalmente suceden de la misma manera			✓	
Justifica la concordancia entre sus observaciones y la predicción termodinámica en el hecho de que la Termodinámica es una ciencia que intenta explicar los procesos reales				✓
INFERENCIAS Y PREDICCIONES				
De carácter macroscópico				
Observa una discrepancia entre sus observaciones y la predicción termodinámica	✓			
Según la Termodinámica, la reacción es siempre espontánea	✓			
Observa una concordancia entre sus observaciones y la predicción termodinámica			✓	✓

VII.3.1.4. Descripción de resultados de la prueba *Rt04* de retención

Actividad 04: ¿un proceso físico (im)posible?

Si dejamos caer un huevo desde cierta altura, éste se romperá al estrellarse en el suelo.

Rt$_{04}$[1]

A. Para este hecho, define el sistema termodinámico y el entorno, y describe los estados inicial y final del sistema.

B. ¿Cómo varían la entropía del sistema $S_{sistema}$ y la entropía del universo $S_{universo}$ desde el estado inicial hasta que se alcanza el estado final?

¿Se relacionan estas variaciones con la evolución del sistema desde el estado inicial hasta el estado final?

Justifica tus respuestas.

Rt$_{04}$[2]

C. Durante este proceso, ¿existen transferencias de energía entre el sistema y el entorno?

¿Crees que durante este proceso se conserva la energía?

Justifica tus respuestas.

D. ¿Sería posible que, en un momento dado, se produjera el proceso inverso, esto es, que el huevo roto se recomponga y ascienda desde el suelo hasta nuestra mano? Tacha la respuesta que consideres adecuada:

□ Sí □ No

Justifica tu respuesta. Para elaborar tu explicación, ¿te has basado en alguno de los conceptos que has citado en los apartados anteriores? ¿En cuáles, y por qué?

Los resultados del *item Rt04(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Adela	Diana	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO						
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS						
Definen explícitamente el sistema termodinámico		✓				✓
El sistema termodinámico es el huevo		✓				
El sistema termodinámico está formado por el huevo y el suelo						✓
Definen implícitamente el sistema termodinámico	✓				✓	
El sistema termodinámico es el huevo	✓		✓	✓	✓	
Confunden sistema y proceso			✓			
Definen explíticamente el entorno		✓				
Entorno es “lo demás”, todo lo que rodea al huevo		✓				
Consideran que durante este proceso se conserva la energía	✓	✓	✓	✓	✓	
Explicita que durante el proceso no se genera nueva energía		✓				

Consideran que durante este proceso se no conserva la energía del sistema						✓
Consideran que durante este proceso se producen transferencias entre el sistema y el entorno	✓			✓	✓	✓
Cita explícitamente procesos de calor	✓	✓			✓	
Considera que el sistema libera energía al entorno por el proceso de calor		✓				
Cita explícitamente procesos de trabajo	✓				✓	
Considera que se produce una acumulación de energía en el sistema durante la caída libre	✓					
Considera que se produce una liberación de energía desde el sistema al entorno como consecuencia de la llegada al suelo	✓					
Considera que se produce un paso de energía de calor a trabajo					✓	
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO						
Relaciones macroscópicas						
Consideran que el sistema es abierto	✓				✓	
Intercambia materia con el entorno	✓				✓	
Intercambia energía con el entorno	✓				✓	
Describen el estado inicial del sistema como el huevo a cierta altura del suelo	✓			✓		✓
Describen el proceso como sucesión de estados intermedios (durante la caída)				✓		
Describen el estado final del sistema como el huevo roto en el suelo	✓			✓		✓
Hacen referencia a los procesos de transferencia de energía que tienen lugar durante el proceso	✓				✓	
Definen la caída como un proceso de trabajo	✓					
Considera que solamente tiene lugar el proceso de trabajo cuando el huevo llega al suelo					✓	
Consideran que, durante la caída, el sistema (huevo) intercambia energía con el entorno por el proceso de calor					✓	
Describen el cambio en las manifestaciones macroscópicas de la energía: energías cinética y potencial				✓		
Describe el sentido de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno		✓	✓			
En el proceso de caída al suelo, el huevo desprende energía al entorno		✓				
Considera que los procesos de calor y de trabajo son los responsables de que el huevo se rompa	✓					
Describe la variación de entropía del sistema durante el proceso termodinámico		✓	✓			
La entropía del sistema (huevo) aumenta durante el proceso		✓	✓			
Hace referencia a los estados de agregación inicial y final del sistema			✓			
El estado inicial del sistema (huevo) es sólido			✓			
El estado final del sistema (huevo) es "aproximadamente" líquido			✓			
Enuncia el principio de conservación de la energía		✓	✓			
No describen las transferencias de energía entre el sistema y el entorno			✓			
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						
Relaciones macroscópicas						
La entropía del sistema habrá aumentado tras el proceso, porque el huevo se desordena al romperse	✓					✓
La entropía del sistema habrá aumentado tras el proceso, porque ha cambiado el estado del sistema					✓	
La entropía del entorno habrá aumentado tras el proceso porque éste implica una liberación de energía desde el sistema		✓				
No justifica la variación de la entropía del universo	✓	✓			✓	
La entropía del universo se habrá mantenido tras el proceso, porque todo en el universo está cambiando de entropía constantemente						✓
La evolución del sistema se relaciona con la variación de entropía del sistema durante el proceso, porque el sistema varía el valor de su entropía entre los estados inicial y final						✓
No relacionan las variaciones de entropía con la evolución del sistema	✓	✓			✓	
Justifica la conservación de la energía del sistema como consecuencia de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno	✓					
Justifican la conservación de la energía apelando al principio de conservación de la energía		✓	✓			

Justifica la no conservación de la energía del sistema como consecuencia de que el sistema libera al entorno una cantidad de energía que se dispersa en el entorno						✓
No justifican la conservación de la energía						
INFERENCIAS Y PREDICCIONES						
De carácter macroscópico						
No predicen la variación de la entropía del sistema debido al proceso de caída al suelo		✓				
Predicen que la entropía del sistema habrá aumentado tras el proceso de caída al suelo	✓				✓	✓
No predicen la variación de la entropía del universo debido al proceso de caída al suelo		✓				
Predicen que la entropía del universo no variará	✓				✓	✓
Predicen que la entropía del sistema y del universo, en el estado inicial, serán la misma		✓				
La entropía del entorno habrá aumentado tras el proceso		✓				

Los resultados del *item Rt04(2)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Brais	Adela	Diana	Clara	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO							
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS							
Consideran imposible que suceda el proceso contrario a la caída del huevo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
La caída y ruptura del huevo es espontánea	✓	✓					✓
La caída y ruptura del huevo es no espontánea							
La caída ruptura del huevo es irreversible	✓	✓		✓	✓		✓
Definen la espontaneidad	✓	✓				✓	
Definen la (ir)reversibilidad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consideran que existe una relación entre la espontaneidad y la reversibilidad de los procesos	✓			✓		✓	
No responden	✓	✓		✓		✓	
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO	✓						
Relaciones macroscópicas				✓	✓	✓	✓
Proceso espontáneo es aquél que sucede a temperatura ambiente		✓	✓				
Proceso espontáneo es aquél en el que (el sistema) gana desorden	✓			✓	✓	✓	✓
Proceso espontáneo es el que sucede espontáneamente							
Proceso irreversible es aquél en el que el sistema no puede recuperar su estado inicial							
Proceso irreversible es aquél que no vuelve hacia atrás	✓						
Proceso irreversible es aquél que no coexiste con su correspondiente proceso inverso				✓			
Proceso irreversible es todo aquél en el que la estructura del sistema se descompone (toda reacción química y todo proceso físico que implique una *rotura* del sistema)						✓	
Proceso reversible es todo aquél que puede tener lugar en el sentido inverso (procesos de transición de fase)	✓						
Considera que el proceso inverso es la relación que existe entre la espontaneidad y la reversibilidad de los procesos		✓					
Considera que existen procesos espontáneos que pueden ser reversibles				✓			
Considera que no todo proceso espontáneo es irreversible						✓	
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS						✓	
Relaciones macroscópicas							

El huevo roto no puede recomponerse porque se ha dispersado la energía responable de que el huevo se haya roto				✓			
Indica explícitamente que la energía liberada por el sistema (huevo) al entorno es irrecuperable						✓	✓
El huevo roto no puede recomponerse porque el proceso de recomposición es no espontáneo						✓	✓
(Implícitamente) El huevo roto no puede descomponerse porque el proceso de recomposición es no espontáneo							
El proceso de caída y ruptura del huevo es espontáneo porque sucede a temperatura ambiente	✓	✓					
El proceso de caída y ruptura del huevo es espontáneo porque (¿el sistema?) gana desorden		✓					
El proceso de caída y ruptura del huevo es irreversible porque una vez que el huevo se rompe y libera energía el sistema no puede recuperar el estado inicial						✓	
El proceso de caída y ruptura del huevo es irreversible porque la estructura del sistema se ha visto alterada debido al proceso	✓						
Justifica la elección de los criterios de espontaneidad basándose en que son conceptos que permiten saber si el proceso es o no espontáneo	✓						
Justifica la elección de los criterios de espontaneidad aludiendo a la Ecuación Fundamental de la Termodinámica				✓			
INFERENCIAS Y PREDICCIONES						✓	
De carácter macroscópico							
Eligen algún criterio de espontaneidad	✓						
Eligen $\Delta H_{sistema}$		✓					
Eligen $\Delta S_{sistema}$							✓
Eligen $\Delta G_{sistema}$							
Eligen $G_{sistema}$							
Eligen $G_{universo}$	✓	✓		✓		✓	✓
Eligen $\Delta G_{universo}$	✓	✓				✓	✓
Considera que $\Delta G_{sistema}$ es suficiente para predecir la espontaneidad	✓	✓				✓	✓
Justifican su respuesta				✓			
No justifican su respuesta				✓			

VII.3.1.5. Descripción de resultados de la prueba *Rt05* de retención

Actividad 05: los enunciados de la Termodinámica

La Termodinámica se basa en tres enunciados que formulan sus Principios fundamentales.

A continuación se recogen los enunciados más famosos de los tres Principios de la Termodinámica:

Primer Principio: "existe una función de estado extensiva *E*, energía total del sistema, tal que, para cualquier proceso en un sistema cerrado, se verifica $\Delta E = q + w$"

Segundo Principio (enunciado de Kelvin-Plank): "Es imposible construir una máquina térmica que, operando cíclicamente, no produzca más efecto que la absorción de energía de un foco calorífico y la realización, por parte del sistema, de un trabajo equivalente sobre el entorno."

Tercer Principio (enunciado de Nernst-Simon): "en cualquier proceso isotérmico que implique sustancias puras solamente, cada una de ellas en equilibrio interno, la variación de entropía tiende a cero cuando la temperatura absoluta tiende a cero."

Existen más enunciados formales para los Principios, y algún que otro "enunciado curioso":

Primer Principio: "No se puede ganar."
Segundo Principio: "No se puede empatar."
Tercer Principio: "No se puede abandonar el juego."

Rt$_{05}$[1]

A. Explica la relación que existe entre cada uno dos enunciados formales de la Termodinámica y su correspondiente "enunciado curioso".

.....

B. Suponiendo que realizamos en un matraz la reacción del cinc sólido con el ácido clorhídrico:

$$Zn_{(s)} + 2\ HCl_{(aq)} \rightarrow H_{2\ (g)} + ZnCl_{2\ (aq)}$$

¿Crees que son aplicables los Principios de la Termodinámica para explicar la reacción?

Aquellos Principios que consideres aplicables, ¿qué información nos aportan sobre el sistema, y/o sobre los procesos que en él tienen lugar? Justifica tus respuestas.

.....

Los resultados del *item Rt05(1)* se describen en la siguiente tabla:

UNIDADES DE ANÁLISIS / OPERACIONES	Ana	Alfonso	Benito	Adela	Darío
RECONOCIMIENTO DEL FENÓMENO					
ELECCIÓN DE HIPÓTESIS / RESPUESTAS					
Según el Primer Principio, el sistema no puede ganar energía mediante ningún proceso	✓				
Según el Primer Principio, no se puede ganar más energía que la que se transfiera por los procesos de calor y de trabajo		✓			
Según el Primer Principio, la función de estado extensiva siempre va a tener un valor máximo que no se podrá aumentar			✓		
Según el Primer Principio de la Termodinámica, la energía se conserva				✓	
Según el Primer Principio, un sistema cerrado no puede ganar energía					
Según el Primer Principio, nunca se puede tener más energía que la que suman los procesos de calor y trabajo					✓
Según el Segundo Principio, la energía del sistema y la del entorno no son iguales en ningún momento	✓				

Según el Segundo Principio, no pueden ser iguales la absorción de energía de un foco calorífico y la realización de un trabajo equivalente sobre el entorno		✓			
Según el Segundo Principio, ningún motor cíclico podrá equiparar el calor recibido al trabajo realizado, debido a que siempre se producen pérdidas			✓		✓
No interpreta el Segundo Principio					
Según el Tercer Principio, la variación de la entropía nunca es nula en los proceso isotérmicos	✓				
Según el Tercer Principio, las moléculas de los sistemas no cambian su orden a temperaturas que tienden a cero (no especifica si la temperatura es absoluta o no)		✓			
Según el Tercer Principio, cualquier proceso que implique una serie de pasos es cíclico cuando la temperatura y la entropía tienden a cero					✓
No interpreta el Tercer Principio			✓		
Considera que la reacción propuesta verifica todos los Principios				✓	
Considera que la reacción propuesta verifica el Primer Principio		✓	✓	✓	✓
Considera que la reacción propuesta no verifica el Primer Principio	✓				
Justifica su respuesta	✓	✓	✓		✓
Considera que la reacción propuesta verifica el Segundo Principio		✓	✓	✘	✓
Considera que la reacción propuesta no verifica el Segundo Principio	✓				
Justifica su respuesta	✓	✓	✓		✓
Considera que la reacción propuesta verifica el Tercer Principio			✓	✘	✓
Considera que la reacción propuesta no verifica el Tercer Principio	✓	✓			
Justifica su respuesta	✓	✓	✓		✓
DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO					
Relaciones macroscópicas					
La variación de energía total es igual a la energía en forma de calor más la energía en forma de trabajo		✓			
Para poder estudiar termodinámicamente un proceso químico, al menos uno de los reactivos ha de encontrarse en estado gaseoso, a fin de que puedan determinarse los valores de ΔH, ΔS y ΔG asociados al proceso de reacción	✓				
Al ajustar la reacción, se observa que permanece constante el número de átomos de los elementos Zn, H y Cl				✓	
Durante la reacción varía la entropía, puesto que el sistema ve afectado su grado de desorden				✓	
RAZONAMIENTOS JUSTIFICATIVOS / EXPLICATIVOS					
Relaciones macroscópicas					
Con los datos disponibles se puede saber si la reacción verifica los Principios de la Termodinámica, porque las energías del sistema aportan la información necesaria					✓
Con los datos disponibles no se puede saber si la reacción verifica los Principios de la Termodinámica, porque no pueden conocerse las variaciones que experimentan las variables termodinámicas fundamentales como consecuencia del proceso	✓				
Con los datos disponibles no se puede saber si la reacción verifica el Tercer Principio, porque habría que conocer la energía del entorno		✓			
Con los datos disponibles no se puede saber si la reacción verifica el Tercer Principio, porque habría que conocer el entorno			✓		
Esta reacción verifica el Primer Principio de la Termodinámica, porque (implícitamente) toda la energía implicada se transfiere por calor y trabajo		✓	✓		
Esta reacción verifica el Primer Principio de la Termodinámica, porque la variación de energía del universo durante el proceso es nula		✓	✓		
Esta reacción verifica el Primer Principio de la Termodinámica, porque en el proceso se conserva la masa				✓	
Esta reacción verifica el Segundo Principio de la Termodinámica, porque el proceso implica pérdidas de energía		✓	✓		

VII.3.2. Análisis mediante esquemas de conocimiento

En este apartado se analizan los esquemas de razonamiento y de acción que activaron los alumnos en las pruebas de retención. Se elaboraron cinco esquemas de razonamiento ***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***),

Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***); y cuatro esquemas de acción: ***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***).

De las manifestaciones escritas que produjeron los estudiantes en sus respuestas a las pruebas *Rt01*,…,*Rt05*, se han extraído las relaciones fundamentales que constituyen esquemas de razonamiento y acción. Para identificar regularidades en los esquemas, se han elaborado las tablas que figuran a lo largo de los apartados siguientes, y en las que se recogen las relaciones pertenecientes a cada ***ER*** o ***EA***, asociadas a la activación que generó cada individuo de la muestra.

En los dos apartados siguientes se describen e interpretan los esquemas de razonamiento (*Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento ER1, …, ER5*, pág. 1158) y acción (Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción *EA1, …, EA4*, pág. 1173) idiosincrásicos de los alumnos, ordenados en función del esquema del que forman parte y de la complejidad de la estructura esquemática. Cada apartado dedicado a un esquema contiene a su vez dos: en "análisis general de los resultados" se detalla la frecuencia activación de las relaciones de la ciencia escolar para las dimensiones establecidas, y en "esquemas idiosincrásicos de los alumnos", se describen e interpretan las tablas de datos.

VII.3.2.1. Análisis de resultados respecto de los esquemas de razonamiento *ER1, …, ER5*

Los cinco apartados que vienen a continuación se dedican a la descripción de los esquemas de razonamiento ***ER1***, ***ER2***, ***ER3***, ***ER4*** y ***ER5*** que activaron los alumnos de la muestra en las pruebas de retención.

Esquema *ER1*: *sistemas termodinámicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER1*** (***Sistemas termodinámicos***) que desarrollaron los alumnos en la retención.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, con la frecuencia de activación *f* de cada relación, esto es, el número de veces que los alumnos hicieron explícita cada relación en sus respuestas a las tareas de las pruebas. En la última columna de la tabla se listan los códigos (***Cód***) que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***Sistemas termodinámicos***, representadas por el símbolo ***S***.

*Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento **Sistemas termodinámicos (ER1)**, extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	*f*	Cód
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	32	***S01***
UNIVERSO consta de ENTORNO	31	***S02***
SISTEMA tiene MATERIA	32	***S03***
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	19	***S04***
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	20	***S05***
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	13	***S06***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	13	***S07***
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	4	***S08***
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	11	***S09***
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	5	***S10***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	1	***S11***
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	1	***S12***
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	1	***S13***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	0	***S14***
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	0	***S15***
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	0	***S16***
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	0	***S17***
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	0	***S18***
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	32	***S19***
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	***S20***
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	32	***S21***
FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	2	***S22***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	32	***S23***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	0	***S24***
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	19	***S25***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	25	***S26***
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	19	***S27***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	0	***S28***
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	***S29***
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	32	***S30***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	22	***S31***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	7	***S32***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	1	***S33***
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	1	***S34***
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	1	***S35***
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	1	***S36***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	0	***S37***
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	0	***S38***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	7	***S39***
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	0	***S40***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	22	***S41***
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	7	***S42***
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	1	***S43***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	1	***S44***
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	0	***S45***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	7	***S46***
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	0	***S47***
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	31	***S48***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	31	***S49***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	24	***S50***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	25	***S51***
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	17	***S52***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	13	***S53***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	21	***S54***
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	16	***S55***
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	0	***S56***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	7	***S57***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	0	***S58***
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	0	***S59***

*Activación de las relaciones del esquema de razonamiento **Sistemas termodinámicos (ER1)** en cada una de las 5 pruebas de la batería de retención*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Rt01	135	8	26	(0,25)
Rt02	148	8	25	(0,23)
Rt03	123	7	22	(0,21)
Rt04	115	6	23	(0,23)
Rt05	118	6	29	(0,24)

Solamente se presentaron a ***Rt*** 8 alumnos (faltaron Carlos, Berta, y Débora). Brais no respondió a *Rt03* ni a *Rt04*, Benito dejó en blanco *Rt04* (única prueba que respondió Diana), Clara, *Rt05*.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Sistemas termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos que demostraron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de la batería de retención.

La tabla siguiente, siguiendo la clave de símbolos ya explicada, recoge los esquemas de ***Rt***, categorizados en niveles y subniveles que se denominan niveles *r* (r_1, r_2, …, siendo r_1 el esquema más alejado del referencial de la ciencia escolar). Los datos de los tres estudiantes que no asistieron (Carlos, Berta y Débora) están situados fuera de esta categorización.

*Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento **ER1**, sistemas termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4			r_3			r_2	r_1	-		
	r_{4b}		r_{4a}	r_{3c}	r_{3b}	r_{3a}					
ALUMNOS	**Ana**	**Adela**	**Darío**	**Benito**	**Alfonso**	**Clara**	**Brais**	**Diana**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
UNIVERSO consta de SISTEMA TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
UNIVERSO consta de ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SISTEMA tiene MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MATERIA está formada por PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PARTÍCULAS tienen ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO tiene ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA MECÁNICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA se manifiesta como ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS	·	·	✓	✓	✓	✓	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO interacciona con el ENTORNO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENTORNO impone las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA ABIERTO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA ABIERTO intercambia MATERIA	✓	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA ABIERTO intercambia ENERGÍA	✓	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA CERRADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA CERRADO intercambia ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO puede ser SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIVERSO es SISTEMA AISLADO	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO está delimitado por una PARED	·	·	·	·	·	·	·	·			
SISTEMA TERMODINÁMICO se encuentra en un ESTADO TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADO TERMODINÁMICO se corresponde con ciertos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTADO TERMODINÁMICO se caracteriza mediante FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

FUNCIONES DE ESTADO se pueden definir sobre el UNIVERSO	·	·	✓	✓	·	·	·	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen la COMPOSICIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN EN FASES	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN EN FASES se define atendiendo a los ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO CONDENSADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS DE AGREGACIÓN son ESTADO GASEOSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HETEROGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN EN FASES clasifica los sistemas como SISTEMAS HOMOGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN se refiere a COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el/la NÚMERO DE MOL Y MASA	·	✓	·	·	·	·	·	·			
NÚMERO DE MOL Y MASA cuantifican la CANTIDAD DE MATERIA	·	✓	·	·	·	·	·	·			
NÚMERO DE MOL Y MASA es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	·	✓	·	·	·	·	·	·			
CANTIDAD DE MATERIA no varía durante los PROCESOS QUÍMICOS	✓	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES EXTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIABLES EXTENSIVAS dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS pueden ser VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIABLES INTENSIVAS no dependen de la CANTIDAD DE MATERIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TEMPERATURA es una de las VARIABLES INTENSIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TEMPERATURA se puede definir como TEMPERATURA ABSOLUTA	·	·	✓	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen la PRESIÓN	·	✓	·	·	·	·	·	·			
PRESIÓN es una de las VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen el VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VOLUMEN es una de las VARIABLES EXTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
FUNCIONES DE ESTADO incluyen las MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES dependen de la TEMPERATURA ABSOLUTA	💣	💣	💣	✓	💣	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS se cuantifica mediante la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ENTROPÍA cuantifica el DESORDEN TERMODINÁMICO	💣	💣	💣	💣	💣	✓	·	·			
ENTROPÍA proporciona una medida de la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen la ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES son VARIABLES EXTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES se pueden formular como VARIABLES INTENSIVAS	·	·	·	·	·	·	·	·			

Esquema *ER2*: *procesos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en las pruebas de retención.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER2*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron en la retención de la muestra. Indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para

identificar las relaciones del esquema de razonamiento ***procesos termodinámicos***, representadas por el símbolo ***P***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Procesos termodinámicos (ER2****), extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	*f*	Cód
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	32	*P01*
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	0	*P02*
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	0	*P03*
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	13	*P04*
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	32	*P05*
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	13	*P06*
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	0	*P07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	1	*P08*
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	13	*P09*
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	5	*P10*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	0	*P11*
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	1	*P12*
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	1	*P13*
PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	0	*P14*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	0	*P15*
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	0	*P16*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	1	*P17*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	11	*P18*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	5	*P19*
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	9	*P20*
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	0	*P21*
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	0	*P22*
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	0	*P23*
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	0	*P24*
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P25*
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*P26*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	4	*P27*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	0	*P28*
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	6	*P29*
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	0	*P30*
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	0	*P31*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	0	*P32*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	11	*P33*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	13	*P34*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	10	*P35*
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	6	*P36*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	0	*P37*
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	5	*P38*
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	4	*P39*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	8	*P40*
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	1	*P41*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	0	*P42*
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	0	*P43*
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	0	*P44*
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	0	*P45*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	0	*P46*
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	0	*P47*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	0	*P48*
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	0	*P49*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	0	*P50*
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	0	*P51*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	0	*P52*
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	0	*P53*
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	18	*P54*
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	18	*P55*
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	0	*P56*
CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	0	*P57*

PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS QUÍMICOS	6	*P58*
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	6	*P59*
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	0	*P60*
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	0	*P61*

Activación de las relaciones del esquema de razonamiento ***Procesos termodinámicos*** *(**ER2**) en cada una de las 5 pruebas de la batería de retención*

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(mín,máx)***
Rt01	58	8	9	(0,9)
Rt02	37	8	9	(0,7)
Rt03	30	7	5	(0,5)
Rt04	81	6	16	(0,14)
Rt05	47	6	13	(0,13)

Solamente se presentaron a ***Rt*** 8 alumnos (faltaron Carlos, Berta, y Débora). Brais no respondió a *Rt03* ni a *Rt04*, Benito dejó en blanco *Rt04* (única prueba que respondió Diana), Clara, *Rt05*.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Procesos termodinámicos***, se elaboraron los correspondientes esquemas de razonamiento idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER2***, ***Procesos termodinámicos***, *idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4	r_3		r_2			r_1		-		
				r_{2c}	r_{2b}	r_{2a}	r_{1b}	r_{1a}			
ALUMNOS	**Darío**	**Ana**	**Adela**	**Alfonso**	**Benito**	**Clara**	**Diana**	**Brais**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
SISTEMA experimenta PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian por ETAPAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS siguen un determinado CAMINO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO consiste en la SUCESIÓN DE ESTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CAMINO TERMODINÁMICO se recorre en un SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SUCESIÓN DE ESTADOS se realiza entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS INICIAL Y FINAL no coinciden en un PROCESO ABIERTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL coinciden en un PROCESO CÍCLICO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
SUCESIÓN DE ESTADOS supone el paso por ESTADOS INTERMEDIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTADOS INTERMEDIOS están comprendidos entre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO ABIERTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO TERMODINÁMICO puede ser un CAMINO CERRADO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
CAMINO CERRADO define un PROCESO CÍCLICO	✓	·	·	·	·	·	·	·			

PROCESO CÍCLICO implica nulas VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	✖	✖	✖	✖	·	·	·	·			
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE MATERIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PARED puede permitir TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE MATERIA	·	✓	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden implicar TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el CALOR	✖	·	✓	✖	✖	✓	✓	·			
CALOR se relaciona con la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓	·	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CALOR puede ser CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR A VOLUMEN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR puede ser CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR A PRESIÓN CONSTANTE equivale a VARIACIÓN DE ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR depende del / la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·			
"CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA" depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA incluyen el TRABAJO	✖	✓	✓	✖	✖	✓	✓	·			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO se relaciona con la VARIACIÓN DE VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	·	✓	✓	·			
TRABAJO puede ser TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA dependen del CAMINO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA se cuantifican mediante la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA verifican la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	·	·	✓	✓	·	·	✓			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA se cuantifica mediante la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS dependen de las CONDICIONES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO son la TEMPERATURA	✓	✓	·	✓	✓	·	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse TEMPERATURA CONSTANTE	✓	✓	·	✓	✓	✓	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO son la PRESIÓN	·	·	✓	·	·	·	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse PRESIÓN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRESIÓN CONSTANTE permite definir CALOR A PRESIÓN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONDICIONES DEL PROCESO suelen elegirse VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
VOLUMEN CONSTANTE permite definir CALOR A VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOTÉRMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOTÉRMICOS suceden con TEMPERATURA CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOBÁRICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOBÁRICOS suceden con PRESIÓN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ISOCÓRICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ISOCÓRICOS suceden con VOLUMEN CONSTANTE	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS ADIABÁTICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS ADIABÁTICOS implican que sea nulo el CALOR	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS FÍSICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PROCESOS FÍSICOS incluyen los CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CAMBIOS DE ESTADO DE AGREGACIÓN involucran el "CALOR LATENTE"	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR LATENTE depende del / de la "CALOR ESPECÍFICO" / "CAPACIDAD CALORÍFICA"	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS pueden ser PROCESOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

QUÍMICOS											
PROCESOS QUÍMICOS incluyen las REACCIONES QUÍMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS incluyen las DISOLUCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISOLUCIONES dan lugar a SISTEMAS HOMOGÉNEOS	·	·	·	·	·	·	·	·			

Esquema *ER3*: *aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*

Se presentan los esquemas de razonamiento de ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos en las pruebas de retención de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de razonamiento ***ER3*** de los alumnos, con las correspondientes frecuencias de activación *f* y los códigos ***Cód*** mediante los que se describen las relaciones del esquema, representadas por el símbolo ***A***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** *(**ER3**), extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	6	***A01***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	0	***A02***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	23	***A03***
BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	10	***A04***
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	13	***A05***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	0	***A06***
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	0	***A07***
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	13	***A08***
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	***A09***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	0	***A10***
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	***A11***
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	26	***A12***
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	26	***A13***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	***A14***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	32	***A15***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	15	***A16***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	14	***A17***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	1	***A18***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	1	***A19***
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	0	***A20***
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	29	***A21***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	25	***A22***
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	25	***A23***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	13	***A24***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	0	***A25***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	0	***A26***
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	7	***A27***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	20	***A28***
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	5	***A29***
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen	13	***A30***

VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS		
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	0	***A31***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	0	***A32***
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	6	***A33***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	0	***A34***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	7	***A35***
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	0	***A36***
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	0	***A37***
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A38***
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	10	***A39***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	0	***A40***
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	0	***A41***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A42***
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	0	***A43***
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	17	***A44***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	0	***A45***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA	13	***A46***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	12	***A47***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	0	***A48***
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	9	***A49***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO ($dG < 0$)	5	***A50***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" ($dG = 0$)	0	***A51***
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO ($dG > 0$)	5	***A52***

*Activación de las relaciones del esquema de razonamiento **Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos (ER3)** en cada una de las 5 pruebas de **Rt***

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(mín,máx)***
Rt01	47	8	12	(0,10)
Rt02	141	8	24	(0,22)
Rt03	90	7	20	(0,17)
Rt04	82	6	15	(0,14)
Rt05	41	6	10	(0,8)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos***, se elaboraron los ***ER3*** idiosincrásicos de los alumnos, que después se clasificaron en niveles y subniveles.

*Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento **ER3**, **Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos**, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4			r_3			r_2	r_1	-		
	r_{4b}		r_{4a}	r_{3b}	r_{3a}						
ALUMNOS	**Alfonso**	**Adela**	**Clara**	**Benito**	**Ana**	**Darío**	**Brais**	**Diana**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado TIEMPO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado BALANCE ENERGÉTICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

BALANCE ENERGÉTICO se expresa mediante VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	·			
BALANCE ENERGÉTICO no determina la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en ENDOTERMIA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ENDOTERMIA se debe a la RUPTURA DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
BALANCE ENERGÉTICO se puede resolver en EXOTERMIA	💣	✓	💣	✗	💣	💣	·	✓			
EXOTERMIA se debe a la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante RUPTURA DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
COMPOSICIÓN QUÍMICA cambia mediante FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS TERMODINÁMICOS suceden con determinado SENTIDO DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SENTIDO DEL PROCESO indica la dirección de la EVOLUCIÓN DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se detiene en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA implica VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS	💣	💣	✓	✓	💣	💣	✓	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE TEMPERATURA	💣	💣	✓	✓	💣	💣	✗	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	✓	·	·	·	·	·	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS BÁSICAS incluyen VARIACIÓN DE VOLUMEN	·	·	·	·	·	·	✓	·			
VARIACIÓN DE VOLUMEN interesa cuando se involucra el ESTADO GASEOSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIONES DE LAS FUNCIONES DE ESTADO incluyen VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES	💣	💣	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA es la variación de ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA es la variación de ENTALPÍA	·	·	·	✗	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se puede estimar mediante la ENERGÍA DE ENLACE	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA representa el cambio en la ESTABILIDAD	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENTROPÍA	💣	💣	💣	✓	💣	✓	·	✓			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA es la variación de ENTROPÍA	✓	✗	✗	✓	✓	✓	·	·			
VARIACIONES DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS PRINCIPALES incluyen VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS es la variación de ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere al RENDIMIENTO DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
RENDIMIENTO DEL PROCESO viene dado por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	✓	·	·	✓	·	✓	✓	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO	✗	✗	✗	·	✗	✗	✗	✗			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS IRREVERSIBLES	✓	✓	✓	·	✓	✓	✓	✓			
REVERSIBILIDAD DEL PROCESO clasifica los procesos en PROCESOS REVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
PROCESOS REVERSIBLES son una idealización de los PROCESOS IRREVERSIBLES	·	·	·	·	·	·	·	·			
IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EVOLUCIÓN DEL SISTEMA se refiere a la ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✗	💣	💣	💣	✗	✓	✗	✓			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO viene dada por la DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA limita el TRABAJO ÚTIL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO ÚTIL viene indicado por la VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESPONTANEIDAD DEL PROCESO se estudia mediante algún CRITERIO DE ESPONTANEIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD es asimismo CRITERIO DE EQUILIBRIO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			

DE LA ENTALPÍA DEL SISTEMA											
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado no es VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA DEL SISTEMA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENROPÍA DEL UNIVERSO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIO DE ESPONTANEIDAD adecuado es VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA	✓	💣	✓	✓	✓	💣	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es ESPONTÁNEO (dG < 0)	✓	✖	✓	✓	✓	✖	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es "DETENIDO" (dG = 0)	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE GIBBS DEL SISTEMA indica si un proceso es NO ESPONTÁNEO (dG > 0)	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	·			

Esquema ER4: Dinámica de los procesos químicos

Se presentan los esquemas de razonamiento de *Dinámica de los procesos químicos* que desarrollaron los alumnos en la retención de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, los subesquemas y las relaciones que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento *Dinámica de los procesos químicos* de los alumnos, y se indica la frecuencia de activación ***f*** y el código ***Cód*** de identificación las relaciones de ***ER4***, representadas por el símbolo ***D***.

*Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento **Dinámica de los procesos químicos (ER4)**, extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	*f*	Cód
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	26	*D01*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	26	*D02*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMOQUÍMICA	23	*D03*
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	2	*D04*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	0	*D05*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	0	*D06*
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	0	*D07*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	0	*D08*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	25	*D09*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	13	*D10*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D11*
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	0	*D12*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	10	*D13*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	4	*D14*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	2	*D15*
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	10	*D16*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	4	*D17*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	3	*D18*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	6	*D19*
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	4	*D20*

PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	5	*D21*
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	4	*D22*
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	11	*D23*
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D24*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D25*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D26*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	0	*D27*
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	0	*D28*
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	0	*D29*
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D30*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	6	*D31*
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D32*
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	0	*D33*
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	0	*D34*
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D35*
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D36*
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	0	*D37*
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	0	*D38*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	0	*D39*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	0	*D40*
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	0	*D41*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	0	*D42*
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	0	*D43*

*Activación de las relaciones del esquema de razonamiento **Dinámica de los procesos químicos (ER4)** en cada una de las 15 actividades de la fase previa*

ACTIVIDAD	***F***	***A***	***R***	***(mín,máx)***
Rt01	27	8	4	(0,4)
Rt02	33	8	5	(0,5)
Rt03	27	7	7	(0,7)
Rt04	49	6	9	(0,9)
Rt05	48	6	13	(0,13)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Dinámica de los procesos químicos***, se elaboraron los esquemas de razonamiento idiosincrásicos ***ER4***, categorizados en los niveles y subniveles de la tabla siguiente.

*Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento **ER4**, **Dinámica de los procesos químicos**, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4		r_3	r_2			r_2	r_1	-		
	r_{4b}	r_{4a}		r_{2c}	r_{2a}	r_{2a}					
ALUMNOS	**Darío**	**Benito**	**Alfonso**	**Ana**	**Adela**	**Clara**	**Brais**	**Diana**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
PROCESOS TERMODINÁMICOS se estudian mediante la DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

la TERMOQUÍMICA											
TERMOQUÍMICA tiene por enunciados principales las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE LAVOISIER-LAPLACE	·	·	·	·	·	·	·	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA incluyen la LEY DE HESS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMOQUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: DU = q + w	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS comprende la TERMODINÁMICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✖	✓			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por enunciados principales los PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TÉRMICO es la base del PRINCIPIO CERO DE LA TERMODINÁMICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE PRIMERA ESPECIE	✓	✓	✓	·	·	·	✓	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	·	·	·	✓	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA justifica la imposibilidad del MÓVIL PERPETUO DE SEGUNDA ESPECIE	✓	✓	✓	·	·	·	✓	·			
DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA es la base del SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	·	·	·	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA incluyen el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO explica el TERCER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA tiene por ecuación general la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
TEMPERATURA ABSOLUTA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	✖	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS interviene en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: DG = DH – T·DS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA QUÍMICA incluye conceptos que permiten definir la TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA se basa en la PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS no analiza la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca la CINÉTICA QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
CINÉTICA QUÍMICA estudia la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
TIEMPO DEL PROCESO permite definir la VELOCIDAD DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO se modifica con la CATÁLISIS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CATÁLISIS no afecta al EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
VELOCIDAD DEL PROCESO directo e inverso se igualan en el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
DINÁMICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS abarca el EQUILIBRIO QUÍMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO QUÍMICO estudia el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO verifica que el proceso está "DETENIDO" (dG = 0)	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica EQUILIBRIO MATERIAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO MATERIAL implica el EQ. QUÍMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO MECÁNICO	·	·	·	·	·	·	·	·			
EQUILIBRIO TERMODINÁMICO implica el EQUILIBRIO TÉRMICO	·	·	·	·	·	·	·	·			

Esquema *ER5*: *aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos*

físicos y químicos

Se presentan aquí los esquemas de razonamiento de ***aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos*** que desarrollaron los alumnos en la retención de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, junto con los subesquemas y sus relaciones, que se han seleccionado para elaborar los esquemas de razonamiento ***ER5*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las pruebas de retención. Se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones del esquema ***aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos*** están representadas por el símbolo ***M***.

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de razonamiento ***Aspectos microscópicos de la dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5)****, extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	*f*	Cód
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	4	*M01*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	4	*M02*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	0	*M03*
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	0	*M04*
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M05*
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M06*
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	0	*M07*
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	0	*M08*
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	19	*M09*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	4	*M10*
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	1	*M11*
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	1	*M12*
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M13*
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M14*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	0	*M15*
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	0	*M16*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	15	*M17*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	0	*M18*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	16	*M19*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	16	*M20*
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	15	*M21*
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	19	*M22*
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	0	*M23*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	0	*M24*
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	0	*M25*
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	0	*M26*
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	0	*M27*
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	0	*M28*
REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	2	*M29*

Activación de las relaciones del esquema de razonamiento Aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos físicos y químicos (ER5) en cada una de las 7 pruebas de retención

ACTIVIDAD	*F*	*A*	*R*	*(min,máx)*
Rt01	33	8	8	(0,7)

Rt02	32	8	7	(0,7)
Rt03	38	7	8	(0,8)
Rt04	0	6	0	(0,0)
Rt07	13	6	5	(0,5)

Solamente se presentaron a ***Rt*** 8 alumnos (faltaron Carlos, Berta, y Débora). Brais no respondió a *Rt03* ni a *Rt04*, Benito dejó en blanco *Rt04* (única prueba que respondió Diana), Clara, *Rt05*.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de razonamiento ***ER5***, ***Aspectos microscópicos de la Dinámica de los procesos químicos****, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4	r_3		r_2			r_1		-		
ALUMNOS	**Darío**	**Alfonso**	**Benito**	**Adela**	**Ana**	**Clara**	**Brais**	**Diana**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
PARTÍCULAS establecen INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	✓	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una DISTANCIA DE ENLACE	·	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS tienen una FUERZA DE ENLACE	·	·	·	·	·	·	·	·			
FUERZA DE ENLACE aporta ESTABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS determinan los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
NIVELES DE ENERGÍA se corresponden con distintos MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MICROESTADOS DE ENERGÍA tienen asociada una determinada PROBABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS es un criterio para establecer los MICROESTADOS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
PARTÍCULAS sufren DESORDEN TERMODINÁMICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la TEMPERATURA ABSOLUTA	✓	✓	✓	·	·	·	·	·			
TEMPERATURA ABSOLUTA parte del CERO ABSOLUTO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO es nulo en el CERO ABSOLUTO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
DESORDEN TERMODINÁMICO depende de la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISOLUCIONES se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	·	·	·	·	·	·	·	·			
COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS implican cambios en la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL se debe a la DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA se realiza entre los NIVELES DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según ESTADOS DE AGREGACIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL es diferente según COMPOSICIÓN QUÍMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS se producen por COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS suponen la RUPTURA DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
RUPTURA DE INTERACCIONES requiere el aporte de una ENERGÍA DE ENLACE	·	·	·	·	·	·	·	·			
RUPTURA DE INTERACCIONES implica una pérdida de ESTABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			
REACCIONES QUÍMICAS suponen la FORMACIÓN DE INTERACCIONES	·	·	·	·	·	·	·	·			
FORMACIÓN DE INTERACCIONES genera ESTABILIDAD	·	·	·	·	·	·	·	·			

REACCIONES QUÍMICAS requieren el aporte de una ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	✓	·	·	·	·	✓	·	·			

Se extraen las siguientes conclusiones sobre la activación de relaciones microscópicas durante la retención

Las frecuencias de activación *f* correspondientes a los distintos ***ER***s dan una idea de una cierta incorporación de los modelos microscópicos para la interpretación de los procesos termodinámicos. La construcción de conocimientos sobre los aspectos energéticos asociados a los cambios que suceden en los sistemas se vio tímidamente acompañada por una integración de los modelos científicos que dan cuenta de los procesos desde el punto de vista de los enlaces químicos, y en cuanto a los modelos de estructura corpuscular de la materia, los alumnos avanzaron en sus ideas sobre la composición y el comportamiento de los sistemas.

VII.3.2.2. Análisis de resultados respecto de los esquemas de acción *EA1, …, EA4*

Los cuatro apartados que vienen a continuación están dedicados a la descripción de los esquemas de acción ***EA1*** (*Esquema* ***EA1****: Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*), ***EA2*** (*Esquema* ***EA2****: Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*), ***EA3*** (*Esquema* ***EA3****: Representación gráfica de aspectos termodinámicos*) y ***EA4*** (*Esquema* ***EA3****: Representación gráfica de aspectos termodinámicos*) que activaron los alumnos en la retención de la muestra.

Esquema *EA1*: *Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de retención de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones de los esquemas de acción ***EA1*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas en la retención. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción ***EA1***, representadas por el símbolo ***I***.

*Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (**EA1**), extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	*f*	**Cód**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	32	*I01*

ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	32	*I02*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	32	*I03*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	32	*I04*
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	32	*I05*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	30	*I06*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	22	*I07*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	1	*I08*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	22	*I09*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	13	*I10*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	13	*I11*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	21	*I12*
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS	7	*I13*
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	30	*I14*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	14	*I15*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	1	*I16*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	1	*I17*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	25	*I18*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	13	*I19*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	20	*I20*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	13	*I21*
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	27	*I22*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	26	*I23*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	26	*I24*
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	26	*I25*
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	0	*I26*
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	0	*I27*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	17	*I28*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	11	*I29*
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	7	*I30*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	32	*I31*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	0	*I32*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	0	*I33*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	2	*I34*
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	0	*I35*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	12	*I36*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	4	*I37*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	8	*I38*
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	5	*I39*
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	32	*I40*
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	32	*I41*

*Activación de las relaciones del esquema de acción **Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos (EA1)** en cada una de las 5 pruebas de la batería de retención*

ACTIVIDAD	*f*	*A*	*R*	*(mín,máx)*
Rt01	109	8	22	(0,19)
Rt02	182	8	30	(0,29)
Rt03	132	7	29	(0,24)
Rt04	128	6	22	(0,22)
Rt05	122	6	27	(0,25)

Solamente se presentaron a ***Rt*** 8 alumnos (faltaron Carlos, Berta, y Débora). Brais no respondió a *Rt03* ni a *Rt04*, Benito dejó en blanco *Rt04* (única prueba que respondió Diana), Clara, *Rt05*.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

Sobre la base del referencial ***Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, y se categorizaron en los niveles y subniveles

*Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción **EA1**, Identificación, descripción e interpretación de procesos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4				r_3		r_2	r_1	-		
	r_{4b}		r_{4a}								
ALUMNOS	Darío	Benito	Alfonso	Adela	Clara	Ana	Brais	Diana	Carlos	Berta	Débora
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS se realiza sobre los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los SISTEMAS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere identificar los PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS se realiza mediante el ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la PRESIÓN	·	·	·	✓	·	·	·	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la VOLUMEN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENTROPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
RECONOCIMIENTO DE LAS MAGNITUDES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			

TERMODINÁMICAS interesa para el / la ENERGÍA DE GIBBS											
ESTUDIO DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica el CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE TEMPERATURA	✓*	✓	✓*	✓*	✓	✓*	✖	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE PRESIÓN	·	·	·	✓	·	·	·	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE VOLUMEN	·	·	·	·	·	·	✓	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	✓*	✓*	✓*	✓*	·	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS interesa para la VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	✓			
CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS incluye el análisis de las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES PROPORCIONALES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES DIRECTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES DIRECTAS la mayoría involucran la TEMPERATURA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES PROPORCIONALES pueden ser RELACIONES INVERSAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
RELACIONES INVERSAS existen entre PRESIÓN y VOLUMEN	·	·	·	·	·	·	·	·			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS pueden consistir en RELACIONES CONTRIBUTIVAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre CALOR, TRABAJO y VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RELACIONES CONTRIBUTIVAS existen entre VARIACIÓN DE ENTALPÍA, VARIACIÓN DE ENTROPÍA y VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS consiste en articular el ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las LEYES DE LA TERMOQUÍMICA	✓	✓	·	·	·	·	·	·			
LEYES DE LA TERMOQUÍMICA se relacionan con la VARIACIÓN DE ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la CALOR	✓	✓	✓	·	·	·	✓	·			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la TRABAJO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA se relacionan con el / la VARIACIÓN DE ENTROPÍA	✓	✓	✓	·	·	·	✓	·			
ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS interesa en el caso del /de los / de las CONTROL Y EXCLUSIÓN DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

Esquema *EA2*: *Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de retención de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge los elementos y relaciones de los esquemas de acción ***EA2*** de los alumnos, a partir de las relaciones activadas en la retención, cada una con su frecuencia de activación *f* correspondiente (número de veces que los estudiantes hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y el códigos ***Cód*** que se utiliza para identificarla dentro del esquema de acción ***EA2*** (símbolo ***R***).

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)****, extraídas de las pruebas de la batería de retención de la muestra*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	34	*R01*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	32	*R02*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	32	*R03*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	22	*R04*
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	22	*R05*
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	33	*R06*
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	33	*R07*
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	25	*R08*
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	24	*R09*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	14	*R10*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS RELATIVAS	13	*R11*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	13	*R12*
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	0	*R13*
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	9	*R14*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	1	*R15*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	0	*R16*
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	8	*R17*
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	0	*R18*
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	0	*R19*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	0	*R20*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	13	*R21*
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	0	*R22*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	1	*R23*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	0	*R24*
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	1	*R25*
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	0	*R26*
CALOR se mide en JULIO/MOL	0	*R27*
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	0	*R28*
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	0	*R29*
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	0	*R30*
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	0	*R31*
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	0	*R32*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	1	*R33*

REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	1	*R34*
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	5	*R35*
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	1	*R36*
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	32	*R37*
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	32	*R38*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	32	*R39*
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	32	*R40*

Activación de las relaciones del esquema de acción ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos (EA2)*** *en cada una de las 5 pruebas de la batería de retención de la muestra*

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(mín,máx)***
Rt01	83	8	13	(0,13)
Rt02	127	8	19	(0,19)
Rt03	110	7	23	(0,22)
Rt04	83	6	14	(0,14)
Rt05	63	6	16	(0,16)

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir del referencial ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos***, se elaboraron los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción ***EA2***, ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos*** *termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4	r_3	r_2			r_1			-		
			r_{2c}	r_{2b}	r_{2a}	r_{1c}	r_{1b}	r_{1a}			
ALUMNOS	**Darío**	**Ana**	**Benito**	**Clara**	**Alfonso**	**Adela**	**Brais**	**Diana**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS involucra destrezas relacionadas con la REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS requiere la INTERPRETACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓*	✓*	✓	✓	✓	*	*	✓*			
REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS se caracterizan por la CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA	✓*	✓*	✓	✓	✓	*	*	✓*			
CONSISTENCIA EN LA SIMBOLOGÍA requiere la utilización de CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONVENIOS estandarizan los / las NOMBRES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONVENIOS estandarizan los /las SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SIGNOS DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS convierten algunos conceptos en CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se establecen sobre la base de ESCALAS DE MEDIDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			

RELATIVAS											
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENTALPÍA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
ESCALAS RELATIVAS incluyen la de la ENERGÍA DE GIBBS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESCALAS DE MEDIDA pueden ser ESCALAS ABSOLUTAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la TEMPERATURA	✓	·	·	·	·	·	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENERGÍA INTERNA	·	·	·	·	·	·	·	·			
ESCALAS ABSOLUTAS incluyen la de la ENTROPÍA	✓	✖	✓	✖	✖	✖	·	·			
VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS se expresan mediante UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONVENIOS estandarizan los / las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS son la base de las ESCALAS DE MEDIDA	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS expresan la dependencia con respecto a la CANTIDAD DE MATERIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CANTIDAD DE MATERIA en una reacción química se estudia mediante la ESTEQUIOMETRÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el KELVIN	✓	·	·	·	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS incluyen el JULIO/MOL·KELVIN	·	✓	·	·	·	✖	·	·			
VARIACIÓN DE TEMPERATURA se mide en KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CALOR se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRABAJO se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTALPÍA se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENTROPÍA se mide en JULIO/MOL·KELVIN	·	·	·	·	·	·	·	·			
VARIACIÓN DE ENERGÍA DE GIBBS se mide en JULIO/MOL	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES ICÓNICAS	✓	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS se caracterizan por la CONTRIBUCIÓN PERSONAL	✓	·	·	·	·	·	·	·			
CONTRIBUCIÓN PERSONAL interviene a la hora de evaluar los CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	·	✓	✓	✓	·	·			
REPRESENTACIONES ICÓNICAS permiten expresar aspectos relacionados con el DESORDEN TERMODINÁMICO	✓	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante LÉXICO CIENTÍFICO	✓	✓	✓	✓	💣	💣	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se atiene a CONVENIOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la ELIMINACIÓN DE LA POLISEMIA COTIDIANA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LÉXICO CIENTÍFICO se caracteriza por la PRECISIÓN EN EL LENGUAJE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

Esquema *EA3*: *Representación gráfica de aspectos termodinámicos*

Se presentan aquí los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** que desarrollaron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de retención de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge las variables, subesquemas y relaciones con las que se han elaborado los esquemas de acción ***EA3*** de los alumnos, a partir de las relaciones que éstos activaron en la retención de la investigación. Se indica la frecuencia de activación *f* de cada relación (número de veces que los estudiantes

hacen explícita cada relación en sus respuestas a las tareas) y los códigos ***Cód*** que se utilizan para identificar las relaciones del esquema de acción**.**

Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos (EA3)****, extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	***f***	**Cód**
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	1	*G01*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	2	*G02*
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	2	*G03*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	3	*G04*
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	2	*G05*
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	2	*G06*
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	6	*G07*
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	0	*G08*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	0	*G09*
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	0	*G10*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	6	*G11*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	2	*G12*
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	6	*G13*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	3	*G14*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	3	*G15*
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	0	*G16*
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	2	*G17*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	0	*G18*
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	2	*G19*
EJES presentan DIVISIONES	5	*G20*
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	6	*G21*
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	5	*G22*
DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	2	*G23*
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	2	*G24*
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	1	*G25*
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	5	*G26*
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	1	*G27*
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	5	*G28*
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	0	*G29*
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	0	*G30*
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	0	*G31*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	0	*G32*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	0	*G33*
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	0	*G34*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	1	*G35*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	2	*G36*
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	2	*G37*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	5	*G38*
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	5	*G39*

Activación de las relaciones del esquema de acción ***procesos termodinámicos (EA3)*** *en cada una de las 5 pruebas de la batería de retención de la muestra*

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(mín,máx)***
Rt01	89	8	28	(0,19)
Rt02	0	8	0	(0,0)

Rt03	0	7	0	(0,0)
Rt04	0	6	0	(0,0)
Rt05	0	6	0	(0,0)

Solamente se presentaron a ***Rt*** 8 alumnos (faltaron Carlos, Berta, y Débora). Brais no respondió a *Rt03* ni a *Rt04*, Benito dejó en blanco *Rt04* (única prueba que respondió Diana), Clara, *Rt05*.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

El referencial ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** sirvió para elaborar los esquemas de acción idiosincrásicos de los alumnos, esquemas que se categorizaron en los niveles y subniveles que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

*Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción **EA3**, Representación gráfica de aspectos termodinámicos, idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_4			r_3		r_2	r_1		-		
	r_{4c}	r_{4b}	r_{4a}	r_{3b}	r_{3a}						
ALUMNOS	**Alfonso**	**Darío**	**Benito**	**Adela**	**Clara**	**Ana**	**Brais**	**Diana**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
REPRESENTACIÓN DE ASPECTOS TERMODINÁMICOS puede realizarse mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✖	✓	✖	✖	✖	✖	·	✖			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS se caracterizan por la LEGIBILIDAD	✖	✓	✖	✖	✓	✖	·	·			
LEGIBILIDAD requiere la utilización de CONVENIOS	✖	✓	✖	✖	✓	✖	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS consisten en la REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS	✓	✖	✓	✓	✖	✖	·	✖			
REPRESENTACIÓN DE DATOS RELACIONADOS se logra utilizando PARES DE DATOS CONOCIDOS	✖	✓	✖	✖	✓	✖	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS consisten en pares de VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✖	✓	✖	✖	✓	✖	·	·			
PARES DE DATOS CONOCIDOS suelen corresponder a los ESTADOS INICIAL Y FINAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ESTADOS INICIAL Y FINAL se representan en las ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS se pueden organizar en CICLOS DE ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES TERMOQUÍMICAS contienen información sobre los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por EJES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS están constituidas por CURVAS	✖	✓	✓	✖	✖	✖	·	·			
EJES sirven para situar las MAGNITUDES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD INDEPENDIENTE	✓	✖	✓	✓	✖	✖	·	✖			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser la TEMPERATURA	✓	·	✓	✓	·	·	·	·			
MAGNITUD INDEPENDIENTE puede ser el AVANCE DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUDES pueden ejercer de MAGNITUD DEPENDIENTE	✓	✖	✓	✖	✖	✖	·	✖			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
MAGNITUD DEPENDIENTE puede ser la ENTROPÍA	✓	✖	✓	✖	✖	✖	·	✖			
EJES presentan DIVISIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	·			
DIVISIONES son adecuadas a los VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
DIVISIONES son adecuadas a las UNIDADES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✖	·	·			

DIVISIONES deben facilitar la LEGIBILIDAD	✖	✓	✖	✖	✓	✖	·	·			
EJES intersecan en el ORIGEN DE COORDENADAS	✓	·	✖	✓	·	✖	·	·			
CURVAS vienen definidas por los PARES DE DATOS CONOCIDOS	✖	✓	✖	✖	✖	✖	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS CONTINUAS	✓	✓	✓	✓	·	✓	·	·			
CURVAS CONTINUAS contienen información sobre las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	✓	·	·	·	·	·			
CURVAS CONTINUAS incluyen las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	✓	✓	✓	✓	·	✓	·	·			
CURVAS pueden ser CURVAS DISCONTINUAS	·	·	·	·	✖	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS informan sobre los ESTADOS INICIAL Y FINAL	·	·	·	·	✖	·	·	·			
CURVAS DISCONTINUAS incluyen los DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	·	·	·	·	✖	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las DIAGRAMAS ENTÁLPICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con ENTALPÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
DIAGRAMAS ENTÁLPICOS se construyen con AVANCE DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS son los / las GRÁFICAS ENTRÓPICAS	✓	·	·	✖	·	✖	·	✖			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con ENTROPÍA	✓	✖	✓	✖	✖	✖	·	·			
GRÁFICAS ENTRÓPICAS se pueden construir con TEMPERATURA	✓	·	·	✓	·	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			
REPRESENTACIONES GRÁFICAS permiten la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	·	·	·			

Esquema *EA4*: *Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*

Se presentan aquí los esquemas de acción de ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** que demostraron los alumnos en sus respuestas a las pruebas de retención de la muestra.

Análisis general de los resultados

La tabla siguiente recoge los ***EA4*** de los alumnos a partir de las relaciones que éstos activaron al realizar las pruebas de la batería de retención. Se ofrecen la frecuencia de activación *f* correspondiente a cada relación, y el código ***Cód*** identificador de cada una. Las relaciones de ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química*** están representadas por el símbolo ***E***.

*Frecuencias de activación de las relaciones seleccionadas para elaborar los esquemas de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química (**EA4**), extraídas de las pruebas de retención*

RELACIÓN	*f*	Cód
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	32	*E01*
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	32	*E02*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	34	*E03*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	33	*E04*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	32	*E05*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	32	*E06*
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	14	*E07*

SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	23	*E08*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	23	*E09*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	0	*E10*
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	0	*E11*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	0	*E12*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	0	*E13*
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	0	*E14*
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	0	*E15*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	0	*E16*
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	0	*E17*
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	34	*E18*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	34	*E19*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	10	*E20*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	23	*E21*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	0	*E22*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	11	*E23*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	0	*E24*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	0	*E25*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{\text{reversible}}/T$ (MACROSCÓPICA)	0	*E26*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	0	*E27*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	0	*E28*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{\text{expansión}} = -p \cdot \Delta V$	0	*E29*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{\text{sistema}} = -\Delta E_{\text{entorno}}$	0	*E30*
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	11	*E31*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	14	*E32*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	13	*E33*
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	0	*E34*
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	1	*E35*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el ERROR	0	*E36*
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	13	*E37*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	0	*E38*
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	29	*E39*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	0	*E40*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	30	*E41*
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	27	*E42*
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	21	*E43*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	0	*E44*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	12	*E45*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	0	*E46*
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	29	*E47*
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	0	*E48*
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	29	*E49*
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	25	*E50*
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	18	*E51*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	0	*E52*
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	0	*E53*

CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	0	*E54*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	0	*E55*
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	0	*E56*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	0	*E57*
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	0	*E58*
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	18	*E59*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	18	*E60*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	18	*E61*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	13	*E62*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	9	*E63*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	0	*E64*
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	11	*E65*
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	32	*E66*

Activación de las relaciones del esquema de acción Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EA4)*** *en cada una de las 5 pruebas de la batería de retención de la muestra*

ACTIVIDAD	***f***	***A***	***R***	***(mín,máx)***
Rt01	131	8	22	(0,21)
Rt02	210	8	32	(0,32)
Rt03	168	7	28	(0,28)
Rt04	151	6	26	(0,26)
Rt05	98	6	22	(0,22)

Solamente se presentaron a ***Rt*** 8 alumnos (faltaron Carlos, Berta, y Débora). Brais no respondió a *Rt03* ni a *Rt04*, Benito dejó en blanco *Rt04* (única prueba que respondió Diana), Clara, *Rt05*.

Esquemas idiosincrásicos de los alumnos

A partir de las relaciones del referencial ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, se elaboraron los correspondientes esquemas de acción de los alumnos, que aparecen recogidos en la tabla siguiente.

Relaciones y niveles de orden en los esquemas de acción ***EA4***, ***Resolución de problemas en Termoquímica y Termodinámica Química***, *idiosincrásicos de los alumnos*

NIVELES	r_3						r_2	r_1	-		
	r_{3c}	r_{3b}				r_{3a}					
ALUMNOS	**Darío**	**Ana**	**Alfonso**	**Benito**	**Clara**	**Adela**	**Brais**	**Diana**	**Carlos**	**Berta**	**Débora**
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de EMISIÓN DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
EMISIÓN DE HIPÓTESIS condiciona la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES es imprescindible para el ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TERMODINÁMICOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
LECTURA COMPRENSIVA DE LAS CUESTIONES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TABLAS DE DATOS TERMODINÁMICOS aportan VALORES DE LOS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen el LIBRO DE TEXTO	·	·	·	·	·	·	·	·			
OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN incluyen la INTERNET	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS incluye la consulta de ACTIVIDADES YA REALIZADAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE DATOS incluye la REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES	·	·	·	·	·	·	·	·			
REALIZACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES conduce a la OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
OBTENCIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS es la base de la SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS se centra en la TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante TRATAMIENTO MATEMÁTICO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES TERMOQUÍMICAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere la utilización de ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta H = \Delta U + w$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMOQUÍMICA: $\Delta U = q + w$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = q_{reversible}/T$ (MACROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $S = \ln k \cdot p$ (MICROSCÓPICA)	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $w_{expansión} = -p \cdot \Delta V$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen $\Delta E_{sistema} = -\Delta E_{entorno}$	·	·	·	·	·	·	·	·			
ECUACIONES MATEMÁTICAS incluyen la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO requiere REPRESENTACIONES ALGEBRAICAS	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✖	✖	✓*			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
TRATAMIENTO MATEMÁTICO permite la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	·	·	·	·	·	·	·	·			
TRANSFORMACIÓN DE DATOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se realiza mediante REPRESENTACIONES GRÁFICAS	✓	✖	✖	✖	✖	✖	·	✖			
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS ha de tener en cuenta el	·	·	·	·	·	·	·	·			

ERROR											
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS termina con la OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS implica un ERROR	·	·	·	·	·	·	·	·			
OBTENCIÓN DE RESULTADOS SOBRE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS da paso a la INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la ESTABLECIMIENTO DE SIGNIFICADOS	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS requiere el / la REALIZACIÓN DE INFERENCIAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
REALIZACIÓN DE INFERENCIAS se basa en las DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
DEPENDENCIAS DE LAS MAGNITUDES TERMODINÁMICAS se expresan mediante ECUACIONES MATEMÁTICAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✱	✓			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) TRANSFERENCIAS DE ENERGÍA	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ESPONTANEIDAD DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS se refiere al / a la(s) ERROR	·	·	·	·	·	·	·	·			
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS permite llegar a unas CONCLUSIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
CONCLUSIONES están condicionadas por el ERROR	·	·	·	·	·	·	·	·			
CONCLUSIONES son la base sobre de la TOMA DE DECISIONES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TOMA DE DECISIONES tiene por objetivo el CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
TOMA DE DECISIONES atiende a CRITERIOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS TECNOLÓGICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS DE DECISIÓN pueden ser CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los COSTES DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN permiten analizar los PERJUICIOS DEL PROCESO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EXOTERMIA / ENDOTERMIA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE ESPONTANEIDAD	✱	✓	✓	✓	✓	✱	·	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN incluyen los CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE EQUILIBRIO	·	·	·	·	·	·	·	·			
CRITERIOS TERMODINÁMICOS DE DECISIÓN están recogidos en la ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	·	·			
ANÁLISIS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS incluye una etapa de CONTRASTE DE HIPÓTESIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

VII.3.3. Análisis mediante competencias

En este apartado se analizan las competencias que demostraron los alumnos en sus respuestas escritas a las cinco pruebas que conformaron la batería de retención, ***Rt***. Se evalúa el nivel de cuatro competencias (competencia científica, competencia matemática, competencia en el tratamiento de la información y competencia digital y competencia en comunicación lingüística), porque después de

la implementación de la batería de caracterización final de la muestra (*Cf*) se interrumpieron las observaciones de aula y no se dispuso de datos sobre la evolución de las competencias social y ciudadana, y aprender a aprender. El análisis pone especial énfasis en la competencia científica, que está desglosada en tres competencias (capacidades) concretas: identificación de cuestiones científicas, explicación científica de fenómenos y utilización de pruebas científicas, además de las actitudes hacia la Ciencia.

De las manifestaciones escritas que produjeron los estudiantes en sus respuestas a pruebas de retención, se han extraído los elementos de la competencia (unidades de análisis) que vertebran las competencias (capacidades) descritas. A cada elemento de la competencia se le adjudicó una puntuación numérica de acuerdo con los indicadores de la competencia (***IC***s), cuyos valores se obtienen mediante la suma de los valores de los factores de la competencia (***FC***s) que se presentaron en el ***Volumen A***. La evaluación de los aspectos actitudinales se realizó siguiendo la escala de puntuaciones que se describió en el ***Capítulo III***.

La determinación de los niveles de competencia alcanzados en las distintas pruebas se realizó mediante la comparación de los valores de competencia idiosincrásicos con los dos valores referenciales de la ciencia escolar, $\boldsymbol{VRC_1}$ y $\boldsymbol{VRC_2}$, que permiten definir los niveles $\boldsymbol{NC = NC_1,\ldots,NC_5}$. Los resultados de este análisis revelan el aprendizaje que realizaron los alumnos como consecuencia de su interacción con la segunda unidad didáctica ensayada, *Termodinámica Química*, en términos de las competencias que fueron capaces de poner en juego en sus respuestas de manera autónoma (sin ayuda de un experto ni de sus compañeros).

En las tablas que vienen a continuación se recogen los valores medios, aproximados por redondeo a la unidad, para los niveles de las distintas competencias que demostraron los alumnos en las pruebas de retención. Dichos valores se han hallado calculando el promedio estadístico de los niveles de competencia para las 5 pruebas de la batería de retención, en las que los alumnos deben elaborar respuestas escritas a cuestiones de base científica. Las dos últimas columnas de las tablas incluyen el promedio estadístico de los niveles de competencia para el conjunto de la muestra y la desviación típica correspondiente.

Promedio de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en las pruebas de retención

ALUMNO	**Ana**	**Alfonso**	**Brais**	**Benito**	**Carlos**	**Berta**	**Adela**	**Diana**	**Clara**	**Darío**	**Débora**	**Promedio**	**Desviación típica**
Competencia en el conocimiento e interacción con el mundo físico	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Identificación de cuestiones	**2**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,76**

científicas													
Reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia	**3**	**4**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,75**	**1,16**
Reconocer la base científica de la cuestión (conocimientos de la Ciencia y sobre la Ciencia)	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Utilizar estrategias de búsqueda de información científica, comprenderla y seleccionarla	**3**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**4**	**1**	**2,50**	**1,20**
Reconocer los rasgos claves de la investigación científica	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Explicación científica de los fenómenos	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Aplicar (transferir) los conocimientos de la Ciencia	**3**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,25**	**0,89**
Describir y explicar fenómenos científicamente y predecir cambios	**3**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,25**	**0,89**
Reconocer descripciones, explicaciones y predicciones	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Utilización de pruebas científicas	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
Interpretar datos y pruebas, elaborar y comunicar conclusiones	**4**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**4**	**1**	**2,50**	**1,31**
Argumentar en pro y en contra de las conclusiones, e identificar supuestos, pruebas y razonamientos	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Reflexionar sobre las implicaciones sociales de los avances científicos y tecnológicos	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,00**
Actitudes hacia la Ciencia	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,00**
Interés hacia la Ciencia y la actividad científica. Apoyo a la investigación científica. Concepción de Ciencia	**3**	**2**	**2**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,63**	**0,52**
Sentido de la responsabilidad sobre sí mismo, los recursos y el entorno	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**

Alcanzan un nivel de competencia científica aceptable, pero bajo, cuatro de los once alumnos de la muestra. Se ha producido una muerte muestral considerable debido a circunstancias ajenas a la investigación (de hecho, los alumnos que abandonaron la materia de Química también dieron por perdidas otras materias, como Historia o Filosofía).

Entre la prueba de caracterización final y la de retención se observan ligeras diferencias en las competencias (capacidades) primera y segunda. Los resultados, como era de esperar, se decantan a favor de ***Cf***, aunque las disminuciones en el nivel de competencia son pequeñas:

Se observan mejorías en la identificación científica de los fenómenos (reconocer cuestiones investigables desde la Ciencia y reconocer la base científica de la cuestión).

Ningún alumno llega al NC_2 en la explicación científica de los fenómenos, porque la transferencia de conocimientos sigue siendo muy limitada a causa de los pobres modelos de estructura y enlace químico que se han desarrollado. En ***Rt***, los

alumnos tienden a fijarse menos en el reconocimiento de descripciones, explicaciones y predicciones científicas que en ***Cf***, pero a cambio alcanzaron un nivel mejor en la descripción e interpretación de los procesos termodinámicos propuestos. La capacidad de predicción de los cambios energéticos crece en ***Rt*** debido a la consolidación de las relaciones sobre las magnitudes termodinámicas principales, gracias a las cuales los estudiantes son capaces de pronosticar si un proceso sucederá o no en unas condiciones dadas.

En la tercera de las capacidades, utilización de pruebas científicas, se obtienen resultados coincidentes con los anteriores: la interpretación de datos y pruebas es peor que en ***Cf***, pero a cambio los alumnos identifican mejor los supuestos, las pruebas y los razonamientos que antes. Parece que las destrezas de razonamiento trabajadas a lo largo de la intervención se mantienen e incluso están reforzadas, lo que sugiere que la metodología propuesta ha sido eficaz en el desarrollo de destrezas cognitivas que ayuden a los alumnos a interpretar los cambios energéticos que suceden en los sistemas materiales. El único alumno cuyo nivel de destrezas a este respecto se puede considerar alto, es Darío, seguido de cerca por Ana, Alfonso, Adela y Clara.

En cuanto a las actitudes, no se disponía de datos acerca de un cambio actitudinal después de la intervención, y el profesor, Rodrigo, confirmó que los problemas actitudinales proseguían en determinados alumnos. Así pues, para ***Rt*** se adjudicó a los estudiantes los mismos valores actitudinales que se habían calculado para ***Cf***; de ahí que no se observen diferencias en ningún sentido.

Promedio de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en las pruebas de retención

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia matemática	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,13**	**0,35**
Identificar situaciones que exigen conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,88**	**0,64**
Utilizar el lenguaje matemático para cuantificar aspectos relacionados con los fenómenos naturales	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
Utilizar técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar expresar datos e ideas	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
Realizar cálculos sobre los fenómenos naturales	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
Realizar representaciones gráficas sobre fenómenos naturales	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1,50**	**1,07**

Debido a la falta de calculadoras disponibles, en ***Rt*** no se pudo implementar

la prueba que se reservaba para la evaluación de las destrezas relacionadas con el cálculo de resultados termodinámicos a partir de los cuales se pudieran tomar decisiones científicamente fundamentadas. La competencia científica hubo de evaluarse, por lo tanto, sobre la base de las respuestas cualitativas que dieron los alumnos a las pruebas. Se observa que las competencias matemáticas de todos los alumnos están en mínimos comparadas con el nivel que sería deseable desde el punto de vista de la ciencia escolar, y que de ***Cf*** a ***Rt*** se produce una apreciable pérdida de nivel de competencia generalizada en la identificación de conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos, en la utilización de técnicas de cálculo y en la realización de representaciones gráficas, competencia en la que solamente Darío llega al nivel mínimo aceptable. Aunque la tendencia a distanciarse con respecto a las competencias deseables es común a toda la muestra, llaman la atención los datos de Ana, que cae hasta 3 niveles en la utilización del lenguaje matemático y en la identificación de situaciones que requieren un tratamiento matemático. Estos datos confirmarían la tendencia de esta alumna a memorizar fórmulas y *ejercicios-tipo* para preparar los exámenes uno o dos días antes de la prueba escrita; de ahí que sus respuestas a ***Cf*** sean más acordes con las deseables, y que se produzcan pérdidas significativas a medio plazo.

Promedio de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, que demostraron los alumnos en las pruebas de retención

ALUMNO	Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en comunicación lingüística	**4**	**4**	**2**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2**	**4**	**1**	**3,00**	**1,20**
Comprender e interpretar mensajes acerca de las Ciencias	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3,13**	**2,03**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos con contenido científico	**5**	**5**	**2**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,75**	**1,58**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la comunicación de ideas (saber decir)	**5**	**5**	**2**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,75**	**1,58**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción del conocimiento (saber hacer)	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Saberes actitudinales relacionados con las tareas comunicativas: utilizar el lenguaje de forma razonada y dialogante en la regulación de conductas y emociones	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Competencia en el tratamiento de la información y Competencia digital	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Aplicar las formas específicas del trabajo científico para buscar,	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**

recoger, seleccionar la información, procesarla y presentarla													
Utilizar las TIC para comunicarse, recabar información, visualizar situaciones, obtener y tratar datos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los niveles de competencia lingüística mejoran entre ***Cf*** y ***Rt*** en el caso de Ana y Clara, y se mantienen para los demás salvo para Brais y Diana, que pierden un nivel y se quedan en el mínimo NC_1. Con la excepción de los que dejan de asistir a las clases de Química, todos siguen interpretando mensajes de contenido científico sobre los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos, y utilizan el vocabulario científico para expresar sus ideas. En los dos meses que mediaron entre ***Cf*** y ***Rt***, no se produjeron cambios significativos para la competencia en la comunicación de ideas, así que la utilización adecuada del lenguaje en general, en la construcción de conocimiento, sigue siendo deficiente.

En resumen, los resultados del análisis por competencias concuerdan con los del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción: entre ***Cf*** y ***Rt***, se han producido pérdidas en el nivel de competencias.

VII.3.4. Evolución y estabilidad del aprendizaje generado por la metodología ensayada

Para estudiar la influencia de la metodología ensayada en la evolución de las formas de pensar y de hacer de los estudiantes de la muestra, se han realizado dos contrastes cualitativos entre los resultados expuestos en anteriores capítulos, y los discutidos en el presente capítulo:

En primer lugar, se han contrastado los resultados de la retención con los correspondientes a los conocimientos iniciales de los estudiantes (***Capítulos III*** y ***IV***). Este contraste ha permitido comprobar la evolución global del aprendizaje estable que promovió la propuesta de enseñanza. Finalmente, los resultados de la retención se han sometido a contraste con los referidos a los conocimientos finales (***Capítulo VI***). De este modo se ha comprobado qué conocimientos, de los construidos durante la implementación de la propuesta, han permanecido lo suficientemente estables al cabo de cierto tiempo tras la intervención, como para considerar que son resultado de un aprendizaje significativo.

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de razonamiento ER1

Niveles g	**Caracterización inicial**			**Caracterización final**			**Batería de retención**		
	Niveles i	**Nº alumnos**	**Alumnos**	**Niveles** f	**Nº alumnos**	**Alumnos**	**Niveles** r	**Nº alumnos**	**Alumnos**
g_5	i_{2b} i_{2b} i_{1e} i_{1d}	**5**	**Ana Alfonso Adela Clara Darío**	f_4	**3**	**Ana Adela Darío**			
g_4	i_{1c}	**2**	**Benito**	f_3	**3**	**Alfonso**	r_4	**3**	**Ana**

	i_{1b}		Diana			Benito Clara			Adela Darío
g_3							r_3	3	Alfonso Benito Clara
g_2	i_{1a}	1	Brais	f_2	1	Carlos	r_2	1	Brais
g_1				f_1	1	Brais	r_1	1	Diana

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de razonamiento ER2

Niveles g	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos
g_4	i_3	3	Ana Alfonso Darío				r_4	1	Darío
g_3	i_2	3	Benito Adela Clara	f_3	3	Ana Benito Darío	r_3 r_2	5	Ana Alfonso Benito Adela Clara
g_2	i_{1b}	1	Diana	f_2	3	Alfonso Adela Clara	r_1	2	Brais Diana
g_1	i_{1a}	1	Brais	f_1	2	Brais Carlos			

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de razonamiento ER3

Niveles g	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos
g_4				f_2	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío			
g_3							r_4 r_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío
g_2	i_3 i_2	5	Ana Alfonso Adela Clara Darío				r_2	1	Brais
g_1	i_1	3	Brais Benito Diana	f_1	1	Brais Carlos	r_1	1	Diana

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de razonamiento ER4

Niveles g	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos

g_4							r_4 r_3	3	Alfonso Benito Darío
g_3	i_3 i_2	7	Ana Alfonso Benito Adela Diana Clara Darío	f_3	1	Ana			
g_2				f_2	4	Benito Adela Clara Darío	r_2 r_1	5	Ana Brais Adela Diana Clara
g_1	i_1	1	Brais	f_2 f_1	3	Alfonso Brais Carlos			

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de razonamiento ER5

Niveles	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
g	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos
g_4				f_5 f_4 f_3	3	Ana Benito Darío	r_4	1	Darío
g_3				f_2	4	Alfonso Carlos Adela Clara	r_3 r_2	5	Ana Alfonso Benito Adela Clara
g_2				f_1	1	Brais	r_1	2	Brais Diana
g_1	i_1	8	Ana Alfonso Brais Benito Adela Diana Clara Darío						

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de acción EA1

Niveles	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
g	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos
g_4				f_4	2	Ana Benito	r_4	4	Alfonso Benito Adela Darío
g_3	i_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío	f_3	4	Alfonso Adela Clara Darío	r_3	2	Ana Clara

g_2	i_2 i_1	2	Brais Diana	f_2	1	Carlos	r_2	1	Brais
g_1				f_1	1	Brais	r_1	1	Brais

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de acción EA2

Niveles g	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos
g_4				f_4	1	Darío			
g_3	i_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío	f_3	3	Ana Adela Clara	r_4	1	Darío
g_2	i_2	1	Diana	f_2	2	Alfonso Benito	r_3 r_2	4	Ana Alfonso Benito Clara
g_1	i_{1a}	1	Brais	f_1	2	Brais Carlos	r_1	3	Brais Adela Diana

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de acción EA3

Niveles g	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos
g_5	i_{4a}	1	Adela	f_4	1	Benito			
g_4	i_{3a}	2	Ana Darío	f_3	2	Ana Darío	r_3	3	Alfonso Benito Darío
g_3	i_2	2	Alfonso Clara				r_3	2	Adela Clara
g_2	i_{1a}	2	Benito Diana	f_2	2	Alfonso Clara	r_2	1	Ana
g_1	i_{1b}	1	Brais	f_1	3	Brais Carlos Berta	r_1	2	Brais Diana

Resultados del contraste de los niveles globales g para el esquema de acción EA4

Niveles g	Caracterización inicial			Caracterización final			Batería de retención		
	Niveles i	Nº alumnos	Alumnos	Niveles f	Nº alumnos	Alumnos	Niveles r	Nº alumnos	Alumnos
g_5				f_4	1	Ana			
g_4	i_4 i_3	6	Ana Alfonso Benito Adela Clara Darío	f_3	2	Adela Darío			
g_3	i_2	1	Diana	f_2	3	Alfonso Benito Clara	r_3	6	Ana Alfonso Benito Adela

									Clara Darío
g_2				f_1	**2**	**Brais Carlos**	r_2	**1**	**Brais**
g_1	i_1	**1**	**Brais**				r_1	**1**	**Diana**

Queda confirmado que se produce un avance significativo en los esquemas de razonamiento y acción de los alumnos desde la caracterización inicial hasta la caracterización final, como consecuencia de la intervención realizada en el aula. Después de dos meses sin trabajar contenidos de Termoquímica y Termodinámica Química en el aula, los niveles de los esquemas caen solamente en caso de ***ER1*** y ***ER3***, y el retroceso se verifica solamente en un nivel *g*, lo que confirma la efectividad de las dos secuencias de enseñanza propuestas en la construcción de esquemas de razonamiento y acción deseables de la ciencia escolar para el conjunto de la muestra.

VII.4. Contraste de la $sHT_{3.2}$

Queda confirmado que se produce un avance significativo en los esquemas de razonamiento y acción de los alumnos desde la caracterización inicial hasta la caracterización final, como consecuencia de la intervención realizada en el aula. Después de dos meses sin trabajar contenidos de Termoquímica y Termodinámica Química en el aula, los niveles de los esquemas caen solamente en caso de ***ER1*** y ***ER3***, y el retroceso se verifica solamente en un nivel *g*, lo que confirma la efectividad de las dos secuencias de enseñanza propuestas en la construcción de esquemas de razonamiento y acción deseables de la ciencia escolar para el conjunto de la muestra.

Por tanto, la *Subhipótesis* 3.2 se confirma tal como se emitió.

Después de un cierto tiempo desde la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes continúan activando esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Los alumnos continúan demostrando competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Existe una permanencia significativa en los aprendizajes realizados, al cabo de un

cierto tiempo desde la intervención.

TERCERA PARTE: Conclusiones e implicaciones de la investigación. Bibliografía consultada

VIII. Conclusiones e implicaciones de la investigación

Último de esta monografía de Tesis, el ***Capítulo VIII*** recoge las conclusiones globales de la investigación y una serie de implicaciones que de ella se derivan. Estas conclusiones e implicaciones se desglosan a lo largo de varios epígrafes:

Recapitulación de los resultados de la investigación (pág. 1199). Hemos considerado conveniente comenzar este capítulo sintetizando los principales resultados de la investigación, que han permitido realizar el contraste de las hipótesis de trabajo.

Recapitulación de los resultados de la investigación

Hemos considerado conveniente comenzar este capítulo sintetizando los principales resultados de la investigación, que han permitido realizar el contraste de las hipótesis de trabajo.

En esta Tesis se ha presentado una experiencia real, mediante la que se han estudiado los efectos de una unidad didáctica sobre Termodinámica Química en las formas de hacer y de pensar de una muestra de once estudiantes de 2º de Bachillerato. Las hipótesis de la investigación hacen referencia al conocimiento inicial de los alumnos (antes de la implementación de la unidad didáctica ensayada) y a los conocimientos finales a corto y medio plazo después de la misma, con la finalidad de detectar las diferencias producidas en el conocimiento de los estudiantes como consecuencia de su interacción con la metodología. El diseño de la investigación incluyó una fase previa a la intervención, durante la cual se implementó una unidad didáctica sobre Termoquímica, con dos finalidades: en primer lugar, minimizar el impacto del cambio metodológico en el proceso de aprendizaje que se pretendía evaluar (el relacionado con la segunda unidad didáctica), y en segundo lugar, explorar cómo se realizó la construcción de los conocimientos conceptuales y procedimentales que se consideran básicos en el aprendizaje de los aspectos de la Termodinámica Química.

Así pues, durante la fase previa a la intervención, el profesor y los estudiantes se habituaron a trabajar con la nueva metodología y estudiaron los contenidos que hemos considerado necesarios antes de la aplicación de la propuesta didáctica ensayada (contenidos seleccionados mediante un análisis epistémico y un análisis curricular del conocimiento a enseñar).

Según la metodología propuesta, la secuencia de enseñanza ensayada integra los contenidos conceptuales y procedimentales, y busca la promoción de las destrezas cognitivas, el conocimiento epistemológico-científico y las destrezas sociales y de comunicación. Para implementar la secuencia en el aula se diseñaron materiales curriculares que constituyeron el cuaderno de trabajo de los estudiantes.

La dinámica de trabajo que se desarrolló en el aula logró una participación lo más activa posible del profesor (colaborador en esta investigación y satisfecho con las innovaciones metodológicas realizadas) y los alumnos, aunque algunos de éstos

mantuvieron unas actitudes negativas hacia el aprendizaje de las Ciencias (y de otras materias, como han revelado los profesores de Lengua y Literatura Castellana, Lengua y Literatura Gallega, Francés, Filosofía e Historia). El trabajo cooperativo logrado fue fundamental en la construcción de nuevos significados y la adquisición de nuevas destrezas de la ciencia escolar.

Los instrumentos de recogida y tratamiento de la información seleccionados permitieron un seguimiento continuo del proceso de aprendizaje y la evaluación del conocimiento en determinados momentos clave de la investigación, para determinar qué conocimientos tenían los alumnos antes de implementarse la segunda secuencia didáctica, qué conocimientos tenían inmediatamente después de ésta, y qué conocimientos permanecieron al cabo de un cierto tiempo (dos meses). las estrategias de tratamiento de la información han permitido hacer explícitos los esquemas de razonamiento y acción de los estudiantes en distintos momentos de la parte experimental, y poner de manifiesto las competencias que movilizaron los alumnos a medida que dieron respuesta a las cuestiones planteadas.

VIII.1.1. Resultados obtenidos mediante el método de análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción

En los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII*** se han expuesto detalladamente los esquemas de razonamiento y acción idiosincrásicos que activaron los alumnos como consecuencia de la interacción con las dos unidades didácticas ensayadas: *Termoquímica* y *Termodinámica Química*. A continuación se ofrecen unas tablas en las que se resumen, para cada esquema de razonamiento y acción, los principales datos mediante los que se puede concluir hasta qué punto los once estudiantes de la muestra construyeron esquemas de razonamiento y acción deseables de la ciencia escolar que permanecieran estables el tiempo suficiente como para considerar que son fruto de un aprendizaje significativo. Para cada ***ER*** y ***EA*** (incluidos los macroesquemas ***ERT*** y ***EAT***) se indica el número total de relaciones del esquema, qué número de relaciones se pretendía activar en cada momento de la evaluación de conocimientos y cuántas relaciones utilizaron los estudiantes en sus respuestas a las actividades o pruebas planteadas. Además, con la finalidad de reflejar el aprendizaje alcanzado por los once adolescentes de la muestra como consecuencia de la interacción con la metodología ensayada, las tablas que vienen a continuación detallan los valores de dos indicadores, para el conjunto de la muestra estudiada:

En primer lugar, se utiliza el porcentaje de activación (***%Act***), para mostrar qué fracción de las relaciones fueron adecuadamente activadas (✓) en los distintos esquemas de razonamiento y en el macroesquema ***ERT***. El porcentaje de activación de un esquema se define como la cantidad porcentual de relaciones activadas, frente al número total de relaciones del esquema.

En segundo lugar, se utiliza el porcentaje de adquisición (***%Adq***), para

mostrar qué fracción representan las relaciones adecuadamente activadas (✓) con respecto a las que sería deseable que utilizaran en la fase previa, para los distintos esquemas de razonamiento y en el macroesquema ***ERT***. El porcentaje de adquisición asociado a un esquema se define como la cantidad porcentual de relaciones activadas, frente al número de relaciones que se esperaban utilizar a lo largo de la fase previa (cantidad que se ha estimado mediante la resolución de las actividades por parte de expertos, en este caso, los investigadores).

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER1**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	59	59	59	59	59	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	54	54	58	58	58	4	4	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	51	46	51	44	42	–2	–4	–2
% Activación	**86**	**78**	**86**	**75**	**71**			
% Adquisición	**94**	**85**	**88**	**76**	**72**			

Los datos de la tabla anterior muestran que las actividades de las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron éxito en la adquisición, a medio plazo, del 72% de las relaciones que era deseable que se activaran para la descripción de los sistemas termodinámicos. La eficacia de la instrucción realizada en el aula fue de prácticamente el 100% de relaciones esperables para el esquema ***ER1*** (58 relaciones de 59), porque a lo largo de la intervención se trataron todas las ideas de la ciencia escolar salvo la definición microscópica de la entropía en relación con la probabilidad de los microestados de energía del sistema. El dato más llamativo de la tabla se corresponde con la diferencia de activación entre las caracterizaciones final e inicial: en ***Cf*** se utilizaron dos relaciones menos que en la caracterización inicial, aunque se esperaba que se pudieran activar hasta 4 más. Este dato se explica por la tendencia de los alumnos a no describir en lo posible los sistemas termodinámicos; de hecho, de ***Ci*** a ***Cf*** se observa que dejan de clasificar los sistemas en función de sus interacciones con el entorno, y prefieren caracterizar los estados utilizando las magnitudes termodinámicas básicas y principales. Entre la caracterización final y la retención apenas se producen pérdidas. Por lo tanto, se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***ER1*** acordes con las ideas de la ciencia escolar.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER2**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***

Nº de relaciones del esquema	61	61	61	61	61	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	58	58	61	61	61	3	3	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	51	32	49	25	27	–7	–5	2
% Activación	**84**	**52**	**80**	**41**	**44**			
% Adquisición	**84**	**55**	**80**	**41**	**44**			

Las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron éxito en la adquisición, a medio plazo, del 44% de las relaciones, lo que se puede considerar un valor cercano al mínimo deseable (50%, la mitad del esquema) para la descripción de los procesos termodinámicos. Obsérvese que la eficacia de la instrucción durante las fases previa y de intervención fue muy elevada, pero decayó en las pruebas de caracterización. Estos datos no se deben a que los alumnos sólo fueran capaces de activar las relaciones de ***ER2*** con ayuda del profesor, sino a que tendían a responder en pocas palabras las cuestiones que se les formulaban, y (como sucede con ***ER1***) las relaciones de un esquema descriptivo no les parecían suficientemente interesantes como para volcarlas en las pruebas escritas. La retención muestra que a los dos meses los estudiantes mantenían en la memoria las relaciones aprendidas, y de hecho activaron 2 más que en la caracterización final, que tuvo lugar ocho semanas antes de ***Rt***. Entre la caracterización final y la retención apenas se producen pérdidas. De estos datos se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***ER2*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión aceptable, pero no los convencieron de su utilización hasta un punto deseable.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER3**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	52	52	52	52	52	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	29	29	52	52	52	23	23	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	27	18	49	34	29	–14	2	-5
% Activación	**52**	**35**	**94**	**65**	**56**			
% Adquisición	**93**	**62**	**94**	**65**	**56**			

La adquisición de ***ER3*** a medio plazo fue del 56% de las relaciones, aceptable, pero con reservas:

Durante la fase previa, los alumnos activaron la inmensa mayoría de las relaciones que se esperaban (93%), que representaban más o menos la mitad del esquema referencial (52%) sobre la interpretación de los procesos termodinámicos; en las pruebas de caracterización inicial se reveló que llegaban a utilizar de manera

autónoma unos dos tercios del ***ER3*** construido. Después de la fase de intervención, en la que construyeron el esquema casi al completo, la activación volvió a caer en dos tercios, y se produjo una cierta pérdida en los dos meses siguientes a ***Cf***, con lo que el número de relaciones activadas vuelve a los valores de ***Ci***. Al comparar los esquemas correspondientes a ***Ci*** y ***Rt***, se observa que se produjo un cierto olvido en las relaciones que tienen que ver con la conceptualización de la temperatura y con el vínculo entre la diferencia de temperatura entre estados y la liberación de la energía al exterior. Estas relaciones tardaron en construirse, y en ocasiones no se aplicaban adecuadamente porque los alumnos adoptaban un punto de referencia no válido, como sucedió en el caso de la clasificación de los cambios de estado de agregación del agua: varios consideraban que los cambios de estado progresivos son exotérmicos porque "hay que suministrar energía al sistema", lo que científicamente expresa que el sistema absorbe energía por calor y por lo tanto el proceso es endotérmico; pero ellos interpretaban esta afirmación en términos de un aumento de temperatura del sistema (y no del entorno), y asociaban éste a la exotermia.

A cambio, se construyeron bastantes relaciones que tienen que ver con las magnitudes termodinámicas principales.

De los resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***ER3*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que resulta aceptable dado el nivel inicial de conocimientos de los estudiantes, pero que todavía se encontraban en un estado de consolidación y necesitaban de más tiempo para afianzarse como esquemas útiles en la interpretación de situaciones y fenómenos.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER4**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	43	43	43	43	43	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	18	18	41	41	41	23	23	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	20	12	39	16	18	4	6	2
% Activación	**47**	**28**	**91**	**39**	**44**			
% Adquisición	**111**	**67**	**95**	**39**	**44**			

La adquisición de ***ER4*** a medio plazo estuvo cerca del mínimo aceptable. Al principio de la fase experimental, los alumnos llegaron a utilizar más relaciones que las que se pretendían construir, pero en sus respuestas a las pruebas de caracterización siempre tendieron a marginar sus conocimientos sobre la Termodinámica de los procesos químicos como disciplina de las Ciencias. No es un resultado sorprendente, si se tiene en cuenta que estos estudiantes estaban

acostumbrados al aprendizaje en metodologías de tipo tradicional, que tienden a eclipsar los aspectos epistemológicos; además, los propios alumnos preferían centrarse en la realización del mínimo esfuerzo posible para responder las cuestiones planteadas, así que a menos que se diseñaran *ad hoc* algunas pruebas para verificar estos conocimientos, no los exteriorizarían voluntariamente. En la batería de retención se incluyó una cuestión (*Rt05*) encaminada precisamente a indagar en estos aspectos, y los resultados pueden considerarse aceptables aunque no lleguen al 50%, por dos razones: en primer lugar, porque no se alejan significativamente del 50%, y en segundo lugar, porque la activación de relaciones es superior a la demostrada en ***Cf*** y exactamente la mitad de la exteriorizada en ***Fi*** (con la ayuda del profesor). De estos resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***ER4*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que podemos calificar como aceptable, aunque no se logró que los estudiantes prestaran suficiente atención a los aspectos epistemológicos del conocimiento sobre Termodinámica, ni se percibió en ellos un interés manifiesto o motivación por hacer útiles sus nuevas ideas al respecto.

La adquisición de ***ER5*** a medio plazo estuvo también cerca del mínimo aceptable, y la construcción de las relaciones sobre los modelos de partículas, enlace químico y reacción química fue un logro de la metodología ensayada:

Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento ***ER5****, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	29	29	29	29	29	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	15	15	26	26	26	11	11	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	8	0	16	17	12	17	12	-5
% Activación	**28**	**0**	**55**	**59**	**41**			
% Adquisición	**53**	**0**	**62**	**65**	**46**			

Al principio de la fase experimental, los alumnos apenas utilizaban ideas científicas del dominio microscópico, aunque se esforzaron por activar relaciones sobre las partículas para justificar y predecir el comportamiento de los sistemas materiales. Sin embargo, desde el momento en que las relaciones microscópicas pasaron a formar parte de los contenidos que estudiar, los alumnos perdieron por completo el moderado entusiasmo que habían mostrado antes, y en la caracterización inicial no activaron una sola relación sobre los modelos embrionarios de partículas, enlace químico y reacción química que habían

construido. A lo largo de la fase de intervención, gracias a la introducción del concepto de desorden termodinámico y su estimación mediante la entropía de los sistemas, los estudiantes se interesaron nuevamente por responder las cuestiones basándose en modelos de partículas, aunque éstos eran sencillos y fragmentarios. A la hora de volcar sus conocimientos de manera autónoma en respuesta a pruebas de caracterización, tuvieron buen desempeño en ***Cf*** (ninguna pérdida con respecto a la fase de intervención, en la que contaban con ayuda del experto), pero las pérdidas que se produjeron en dos meses son significativas, lo que demuestra que los modelos construidos no estaban consolidados. En los esquemas ***ER5*** de ***Rt***, los estudiantes utilizaron solamente aquellas relaciones conceptuales de las que estaban seguros, las cuales se limitan a los modelos de partículas; los de enlace y reacción química apenas figuran en sus respuestas.

De los resultados mostrados en los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII*** se concluye que las unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de unos esquemas ***ER5*** que podemos considerar embrionarios para el nivel de 2º de Bachillerato. Es hasta cierto punto un logro que se construyeran estos esquemas, pero la falta de confianza de los estudiantes en sus conocimientos y la tendencia a ocultarlos no ayuda a que los esquemas evolucionen en complejidad.

A modo de resumen, se comenta cómo progresó la adquisición de ***ERT*** a como consecuencia de la aplicación de la metodología ensayada:

*Resumen de los datos porcentuales para los macroesquemas de razonamiento **ERT**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	244	244	244	244	244	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	174	174	238	238	238	64	64	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	157	108	204	136	128	28	20	-6
% Activación	**64**	**44**	**84**	**56**	**52**			
% Adquisición	**90**	**62**	**86**	**57**	**54**			

La activación de esquemas de razonamiento se puede considerar aceptable en su conjunto, porque los alumnos llegaron a utilizar el 54% del ***ERT*** que se pretendía construir (sin contar las relaciones sobre Termodinámica Estadística y mecanocuántica, que suponen 6 relaciones menos en el esquema). La utilización autónoma de los conocimientos rondó el 60% en las caracterizaciones inicial y final, y a medio plazo se produjeron pérdidas no significativas en el conjunto de los esquemas de razonamiento construidos. Los esquemas de los alumnos contienen muchas relaciones sobre la descripción de los sistemas materiales utilizando las magnitudes termodinámicas básicas y principales (***ER1***), junto con la interpretación

de los aspectos energéticos de los procesos utilizando las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales (***ER3***); pero los razonamientos elaborados no alcanzaron una profundidad deseable para el nivel de 2º de Bachillerato, porque la construcción de los modelos de la Química (***ER5***) y la conciencia de la naturaleza de la Termodinámica como disciplina(***ER4***) no son tan ricas en conexiones entre elementos del esquema. De los resultados se concluye que las unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de unos esquemas de razonamiento aceptables, cuyo aprendizaje se puede considerar significativo, puesto que se mantuvo dos meses en el tiempo.

En cuanto a los esquemas de acción, se resumen a continuación los resultados de ***%Act*** y ***%Adq*** que se obtuvieron para las distintas etapas de la parte experimental de la investigación:

Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción ***EA1****, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	41	41	41	41	41	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	35	35	41	41	41	0	0	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	35	31	41	38	36	7	5	–2
% Activación	**85**	**76**	**100**	**93**	**88**			
% Adquisición	**100**	**89**	**100**	**93**	**88**			

Los datos de la tabla anterior muestran que las actividades de las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron éxito en la adquisición, a medio plazo, de casi el 90% de las relaciones que era deseable que se activaran para la identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos. Los porcentajes de adquisición son muy elevados en todos los momentos en los que se evaluó el conocimiento procedimental, y la pérdida que se produjo en los dos meses que transcurrieron entre ***Cf*** y ***Rt*** no es significativa (<10%). La utilización autónoma de las ideas de la ciencia escolar es casi comparable a la que demostraron los alumnos con ayuda del profesor, lo que indica que las destrezas y estrategias que se construyeron en ***EA1*** se encontraban casi plenamente en la zona de desarrollo real de los estudiantes. Por lo tanto, se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***EA1*** acordes con las ideas de la ciencia escolar.

Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción ***EA2****, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	40	40	40	40	40	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	34	34	40	40	40	6	6	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	34	25	39	36	26	11	1	-10
% Activación	**85**	**63**	**98**	**90**	**65**			
% Adquisición	**100**	**74**	**98**	**90**	**65**			

Las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron un éxito aceptable en la adquisición, a medio plazo, del 65% de las relaciones para la representación algebraica, léxica e icónica de los aspectos termodinámicos. La eficacia de la instrucción durante las fases previa y de intervención fue muy elevada, pero decayó en las pruebas de caracterización salvo en ***Cf***; estos datos indican que las destrezas que se construyeron estaban en consolidación en el momento en que se implementó ***Ci***, y que se necesitaron más sesiones de trabajo (***Fi***) hasta que los estudiantes fueran capaces de utilizar las relaciones construidas de manera autónoma. Las pérdidas que se produjeron en los dos meses siguientes son elevadas, y devuelven los porcentajes de activación y adquisición a los valores que tenían en la caracterización inicial. En los esquemas de ***Rt*** se observan dificultades relacionadas con la conceptualización de la temperatura (absoluta) y la entropía, y en la consistencia en la simbología; la utilización de las unidades de medida adecuadas no se generalizó tanto como hubiera sido deseable. Sin embargo, la incorporación del léxico científico no es insignificante, si se tiene en cuenta que estos alumnos tenían un vocabulario pobre y descuidado, y dificultades en la redacción ordenada y sistemática de sus ideas. Los avances en la realización de operaciones matemáticas relacionadas con los aspectos energéticos son también notables, en estudiantes que tenían grandes dudas sobre la selección de las operaciones aritméticas básicas para calcular cantidades como la diferencia de temperaturas entre los valores correspondientes a los estados inicial y final.

Dado que los resultados de la retención indican pérdidas significativas, se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***EA2*** acordes con las ideas de la ciencia escolar a corto plazo, pero las destrezas y estrategias trabajadas no se consolidaron lo suficiente como para que en dos meses no se produjeran retrocesos significativos en el desempeño.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción **EA3**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	39	39	39	39	39	0	0	0
Nº de relaciones que se	33	33	39	39	39	6	6	0

esperaba activar								
Nº de relaciones activadas por los alumnos	33	27	26	27	28	0	1	1
% Activación	**85**	**69**	**67**	**69**	**72**			
% Adquisición	**100**	**82**	**67**	**69**	**72**			

La adquisición de ***EA3*** a medio plazo fue del 72% de las relaciones sobre la representación gráfica de los aspectos termodinámicos, lo que constituye un resultado bueno, que además se mantuvo estable en el tiempo hasta un punto en el que los datos de la retención muestran una relación más que los de la caracterización final. Durante la fase previa, los alumnos activaron todas las relaciones que se esperaban, aunque la ayuda del profesor fue muy necesaria, dada la cantidad de dificultades que se presentaron. Los alumnos, de hecho, utilizaron unas cuatro quintas partes de sus conocimientos en la caracterización inicial. Durante la fase de intervención ya no construyeron todas las relaciones que se deseaban, sino que se limitaron a poner en juego las estrategias y destrezas que ya habían sido capaces de utilizar de manera autónoma en ***Ci***. Los resultados de las pruebas de caracterización final y retención confirman que los alumnos continuaron utilizando el mismo número de relaciones hasta dos meses después de la intervención, rasgo indicativo de que los conocimientos procedimentales adquiridos se aprendieron de manera significativa.

Así pues, de los resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***EA3*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que resulta aceptable dado el nivel inicial de conocimientos de los estudiantes sobre la interpretación y realización de representaciones gráficas que sean útiles en la interpretación de los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción **EA4**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	66	66	66	66	66	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	59	59	66	66	66	7	7	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	59	43	58	52	35	9	-6	-17
% Activación	**89**	**65**	**88**	**52**	**53**			
% Adquisición	**100**	**73**	**88**	**79**	**53**			

La adquisición de ***EA4*** a medio plazo se puede considerar aceptable (53%), aunque se observan pérdidas en los dos meses entre ***Cf*** y ***Rt***, debidas a que las destrezas y estrategias sobre la resolución de problemas estaban en proceso de consolidación. En la fase previa, los alumnos utilizaron todas las relaciones que se

pretendían construir, pero nuevamente en sus respuestas a las pruebas de caracterización pusieron en juego las tres cuartas partes del conocimiento procedimental trabajado. En la fase de intervención se observa el mismo efecto que en ***EA3***: los alumnos se limitaron a poner de manifiesto las destrezas y estrategias que estaban afianzando, sin utilizar relaciones nuevas. En ***Cf*** se observan pérdidas, por la ausencia de la ayuda del profesor en la elaboración de respuestas. En esta tesitura, algunas de las destrezas y estrategias se olvidaron, y dos meses después se produjeron retrocesos significativos en su puesta en juego. En todo caso, los esquemas ***EA4*** son aceptables si se tiene en cuenta que se construyó el 53% de las relaciones que se trabajaron en el aula.

De estos resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***EA4*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que podemos calificar como aceptable.

*Resumen de los datos porcentuales para los macroesquemas de acción **EAT**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	186	186	186	186	186	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	161	161	186	186	186	25	25	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	161	126	164	153	125	27	-1	-28
% Activación	**87**	**68**	**88**	**82**	**67**			
% Adquisición	**100**	**78**	**88**	**82**	**67**			

A modo de resumen, se comenta cómo progresó la adquisición de ***EAT*** como consecuencia de la aplicación de la metodología ensayada:

La activación de esquemas de acción se puede considerar aceptable en su conjunto, porque los alumnos llegaron a utilizar los dos tercios del ***EAT*** referencial que se llevó al aula. La utilización autónoma de los conocimientos ronda un 80% en las caracterizaciones inicial y final, pero a medio plazo se produjeron pérdidas significativas en el conjunto de los esquemas de acción construidos, aunque en todo caso los valores final de activación son aceptables.

De los resultados se concluye que las unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas de acción aceptables, pero cuyo aprendizaje no se puede considerar significativo, puesto que no se mantuvo dos meses en el tiempo, porque las destrezas y estrategias no pudieron consolidarse en las sesiones que se llevaron a cabo. Estos resultados se pueden relacionar con la hipótesis que planteó Domínguez (2000) en las conclusiones de su investigación: parece que los esquemas de acción se construyen más lentamente que los de razonamiento; quedaría por determinar si su influencia es efectivamente más

duradera, aunque la estabilidad de los resultados de los ***EA***s parece apuntar también en esta dirección.

VIII.1.2. Resultados obtenidos mediante el método de análisis del aprendizaje por competencias

En las cuatro tablas que vienen a continuación se resumen los niveles que alcanzaron los alumnos en las seis competencias evaluadas, en las distintas caracterizaciones de la muestra: inicial (***Ci***), final (***Cf***) y retención (***Rt***). Se muestran además el promedio de los niveles y la desviación típica para el conjunto de los alumnos que se presentó a cada una de las caracterizaciones:

En la caracterización inicial, se presentaron ocho alumnos, todos menos Carlos, Berta y Débora. En la caracterización final, faltaron Berta, Diana y Débora, con lo cual la muestra también estuvo compuesta de ocho individuos. En la retención, los alumnos presentados volvieron a ser los mismos que en la caracterización inicial.

Dado que la muestra objeto de estudio es de pequeño tamaño, no es necesario realizar un contraste estadístico entre las distintas caracterizaciones; por otra parte, la elevada muerte muestral (3-4 alumnos de 11) devalúa más el interés de analizar estadísticamente los resultados obtenidos. Se puede dar por cierto que la composición de la muestra varió entre los distintos momentos en los que se realizaron las evaluaciones del conocimiento, aunque es previsible que apenas se detectaran cambios en los parámetros estadísticos, porque los resultados de los alumnos que se ausentaron son en todos los casos muy bajos, así que, en la práctica, para todas las caracterizaciones se incluirían los resultados de los 7 alumnos que asistieron a todos los momentos de evaluación, y quedarían fuera de la muestra los datos de Carlos, Berta, Diana y Débora. Hay que destacar que de estos cuatro alumnos, tres repitieron 2º de Bachillerato el curso siguiente: Carlos, Diana y Débora; su profesor de Química volvería a ser Rodrigo.

Los resultados de los parámetros estadísticos que se recogen en las tablas siguientes están calculados para los ocho alumnos que se presentaron en cada caso a las pruebas de caracterización correspondientes. Para interpretar las tablas, debe recordarse que los niveles de las distintas competencias se han calculado con respecto a dos valores referenciales $\boldsymbol{VRC_1}$ y $\boldsymbol{VRC_2}$ (ver ***Volumen A***), que representan distintos valores de potencialidad de interpretación, potencialidad de activación y grado de utilidad en la resolución de cuestiones problemáticas, atribuidos a los conocimientos de la ciencia escolar mediante la resolución de las pruebas y actividades por parte de los expertos (investigadores). $\boldsymbol{VRC_1}$ es el mínimo valor adecuado, y $\boldsymbol{VRC_2}$ se considera un valor elevado, a partir del cual los alumnos ofrecen respuestas comparables a las de los expertos. Así pues, un aumento en el nivel de competencia a lo largo del tiempo indicaría que el alumno avanzó más de

lo que se esperaba en comparación con las ideas de la ciencia escolar que se le pedía que movilizara; y un retroceso en el nivel de competencia indicaría que el estudiante no desarrolló a tiempo todas las destrezas y estrategias en la movilización del conocimiento en la extensión que se le pedía. Si el nivel de competencia de un alumno se mantiene constante a lo largo de los diferentes momentos de la evaluación, quiere decir que sus conocimientos conceptuales y procedimentales avanzaron paralelamente a lo que era de prever, según la transposición didáctica realizada y la planificación prevista para la construcción de conocimientos.

Comparación de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en el conocimiento e interacción con el mundo físico	***Ci***	**3**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,93**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,75**	**0,89**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Identificación de cuestiones científicas	***Ci***	**4**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2**	**4**	**1**	**2,75**	**1,39**
	Cf	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,38**	**1,51**
	Rt	**2**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,76**
Explicación científica de los fenómenos	***Ci***	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
	Cf	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Utilización de pruebas científicas	***Ci***	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,25**	**0,89**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1,75**	**1,04**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Actitudes hacia la Ciencia	***Ci***	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,55**	**0,50**
	Cf	**2**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,55**	**0,50**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1,55**	**0,50**

En la tabla anterior se observa que, redondeando los resultados, los alumnos presentados a las pruebas alcanzaron un nivel promedio NC_2 en la competencia científica en las tres caracterizaciones, pero se observan pérdidas para dos alumnos entre las caracterizaciones inicial y final (Alfonso y Adela), y para otros dos (Ana y Clara) entre la final y la de retención. Los valores de competencia de tres de estos estudiantes, a pesar de las pérdidas, siguen siendo aceptables dos meses después, pero en el caso de Clara la regresión la deja en el nivel mínimo de competencia, junto con los alumnos que presentaron problemas actitudinales.

El retroceso en el nivel de las competencias (capacidades) de identificación de cuestiones científicas y utilización de pruebas científicas tiene su explicación en el abandono de la metodología después de la fase de intervención, a favor de una instrucción de tipo tradicional que permitiera trabajar más rápido en el "adiestramiento" para los exámenes de Selectividad. Durante los dos meses siguientes a la intervención, al no poner en práctica con la misma intensidad las destrezas y estrategias en la resolución de cuestiones de base científica (destrezas y

estrategias que además estaban en un momento de consolidación), los niveles de competencia se resintieron.

Las causas del retroceso en los niveles de competencia de los cuatro alumnos citados en el párrafo anterior, son las siguientes:

En el caso de Ana, las pérdidas se producen en la identificación de cuestiones científicas y en la utilización de pruebas, una vez que pasaron dos meses desde la intervención. Recuérdese que esta alumna tenía un estilo de aprendizaje marcadamente memorístico, y que tendía a focalizar su interés en la realización "correcta" de los cálculos y en la presentación de los guiones de trabajo; su ansiedad por estos aspectos se demuestra en que repasaba tres o cuatro veces cada operación que hacía con la calculadora, y en que pasaba a limpio todos sus apuntes cada día. En el mes de mayo, Ana estaba completamente volcada en preparar los exámenes de Selectividad (en los que obtendría muy buenas calificaciones, en la convocatoria de junio), y sus respuestas a las pruebas de retención reflejan la "prisa" por responder inmediatamente a las preguntas planteadas, ciñéndose a los pocos datos que se puedan extraer en una lectura rápida de la cuestión. La vuelta a una metodología de tipo tradicional afectó a su nivel de competencia (capacidad) en la identificación de cuestiones científicas, porque Ana pasó a centrar su atención en ofrecer una solución rápida a las preguntas planteadas sin reflexionar sobre ellas.

Los resultados de Alfonso caen en la fase de caracterización final y se recuperan en la de retención, porque este alumno siempre tendía a posponer el aprendizaje hasta el último momento. Recuérdese que, en sus interacciones en pequeño grupo, prefería que sus compañeras buscaran las soluciones a las cuestiones planteadas, para después pulirlas él y verter las respuestas en los guiones de trabajo. Cuando Rodrigo anunció que los resultados de la batería de caracterización final contarían para la calificación del trimestre en vez de celebrarse el examen tradicional, Alfonso no pareció reaccionar ante la noticia, y no "preparó la materia" (en palabras del profesor) porque no consideraba que el desempeño en sus respuestas a las pruebas se fuera a evaluar "de verdad". En el caso de la retención, a la que Rodrigo adjudicó un valor de 2 puntos sobre 10 en la calificación final del tercer trimestre, Alfonso ya estaba sobre aviso de que el profesor efectivamente evaluaría sus respuestas, y se esmeró en responderlas con seriedad. Puesto que los niveles de competencia se han calculado con respecto a los niveles referenciales de la ciencia escolar, el hecho de que Alfonso se mantenga en el nivel $\boldsymbol{NC_2}$ entre $\boldsymbol{Ci}$ y $\boldsymbol{Rt}$ revela que continuó avanzando en sus competencias paralelamente al nivel de conocimientos que se le pedía que movilizara.

El retroceso en los resultados de Adela están claramente ligados a la enfermedad que padecía esta chica: el descenso en el nivel global de competencia científica se produce entre $\boldsymbol{Ci}$ y $\boldsymbol{Cf}$, en lo que revela que Adela tuvo dificultades para asimilar adecuadamente en pocas sesiones los conocimientos de la ciencia escolar

sobre Termodinámica; pero aunque su nivel de competencia cae en una unidad, se mantiene por encima del de varios de sus compañeros, y se puede considerar perfectamente aceptable. Tuvo dificultades para construir explicaciones científicas en sus respuestas a las pruebas de caracterización final, pero obsérvese que en la retención su nivel de competencia (capacidad) vuelve a ser adecuado. Estos datos indican que, con el tiempo, Adela continuó consolidando los conocimientos que había aprendido a lo largo de la intervención, y que pasados dos meses seguía siendo capaz de utilizarlos, incluso para responder a cuestiones más abstractas que las presentadas inmediatamente después de la instrucción (las pruebas de ***Rt*** son más conceptualmente demandantes que las de ***Cf***). Las pérdidas que experimentó el nivel de competencia científica de Adela en las otras dos competencias (capacidades), es decir, identificación de cuestiones científicas y utilización de pruebas, sí se produjeron entre ***Cf*** y ***Rt***, se deben a la instrucción de tipo tradicional que se realizó en los dos meses siguientes a la fase experimental de la investigación.

En cuanto a Clara, se trata de una alumna con baja autoestima, que tuvo bastantes dificultades con el estudio de todas las materias de 2º de Bachillerato. Le costaban especialmente las asignaturas "de Letras" (en sus propias palabras), elaborar comentarios de texto y "estudiarse la teoría de Historia"; para intentar potenciar la memorización de los contenidos de esta asignatura, recurría a teatralizaciones mentales de los sucesos históricos, por ejemplo, imaginándose a su propia madre en el papel de Isabel *la Católica*. Según Rodrigo, ésta es una alumna que "estudia mucho, pero no le… no le cunde". Su nivel de competencia en la utilización de pruebas científicas se resintió durante el desarrollo de los contenidos de Termodinámica Química, debido a la rapidez de la introducción de los conceptos y modelos de la ciencia escolar. Precisamente una de las características que más valoraba esta alumna de la nueva metodología es que "había más tiempo para pensar", y la vuelta a la instrucción tradicional parece tener mucho que ver en el descenso que se observa en sus niveles de competencia en la identificación y en la explicación de cuestiones científicas.

Comparación de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia matemática	***Ci***	**4**	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,88**	**1,64**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,13**	**0,35**
Identificar situaciones que exigen conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**4**	**5**	**1**	**3,50**	**1,85**
	Cf	**5**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,25**	**1,98**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,88**	**0,64**

Utilizar el lenguaje matemático para cuantificar aspectos relacionados con los fenómenos naturales	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**4**	**5**	**1**	**3,63**	**1,77**
	Cf	**5**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,25**	**1,98**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
Utilizar técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar datos e ideas	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,50**	**2,07**
	Cf	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,38**	**0,52**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
Realizar cálculos sobre los fenómenos naturales	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,63**	**1,92**
	Cf	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
Realizar representaciones gráficas sobre fenómenos naturales	***Ci***	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,50**	**1,41**
	Cf	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,50**	**1,41**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1,50**	**1,07**

Se observan pérdidas en el nivel de competencia matemática para todos los alumnos que se presentaron a las pruebas, aunque hay que matizar estos resultados:

Entre las pruebas de caracterización inicial y final, las pérdidas se producen en tres alumnos: Ana, Adela y Darío, y se deben a la caída espectacular en la utilización de técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar datos y en la realización de cálculos sobre fenómenos naturales, debido dos causas:

En primer lugar, de *Termoquímica* a *Termodinámica Química* aumenta de manera significativa la dificultad de los cálculos planteados (en la segunda unidad didáctica se trabaja con la ecuación fundamental de la Termodinámica). En segundo lugar, tanto la utilización de los datos numéricos como su interpretación son mucho más complejas: para estudiar los aspectos de espontaneidad hay mucha más necesidad de coordinar las ideas de la ciencia escolar que subyacen a las cantidades numéricas, que para distinguir entre un proceso exotérmico y uno endotérmico atendiendo a la variación de entalpía del sistema.

Además, entre ***Cf*** y ***Rt*** se producen pérdidas en los valores de competencia de cuatro alumnos: Ana, Adela, Clara y Darío, pero esta vez por causas completamente diferentes. De hecho, los niveles de las competencias (capacidades) a las que se aludió en el párrafo anterior permanecen constantes, y en este caso los problemas están en la identificación de cuestiones científicas que requieren el tratamiento matemático, y en la aplicación del lenguaje matemático a la cuantificación de los aspectos relacionados con los fenómenos naturales. En ***Rt***, ninguno de los alumnos utilizó los datos numéricos de las tablas termodinámicas para obtener resultados cuantitativos en los que basar sus explicaciones y justificaciones (tampoco en la prueba *Rt03*, en cuyo enunciado se dan expresamente datos numéricos para el cálculo de la variación de energía de Gibbs del cambio de estado líquido-gas del agua); sí utilizaron las técnicas y métodos matemáticos para interpretar los signos de las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales y para obtener conclusiones sobre la base de estas estimaciones.

Al mismo tiempo, dos de los alumnos, Benito y Darío, mejoraron entre ***Ci*** y ***Rt*** sus destrezas en la realización de representaciones gráficas, con la realización de

gráficas de entropía frente a temperatura (o tiempo); pero en el caso de Benito se verifican pérdidas significativas en la calidad de las representaciones, debido a su decisión de dar prioridad al análisis de la entropía frente al tiempo en lugar de la temperatura, y por las ideas peregrinas que desarrolló sobre el control de las magnitudes (ver resultados del análisis *item* a *item* para *Rt01*). Este retroceso en el nivel de competencia no parece tanto efecto del olvido de los conocimientos adquiridos como no consolidación de los nuevos, porque se produce en un alumno que tenía inicialmente pocas destrezas y estrategias en Matemáticas y que, gracias a la implementación de la segunda unidad didáctica, había experimentado avances en la identificación de situaciones que exigen conocimientos matemáticos y en la utilización del lenguaje matemático para expresar los aspectos termodinámicos. Parece, pues, que la vuelta a una metodología tradicional no le ayudó a consolidar los procedimientos adquiridos.

Comparación de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Braís	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en comunicación lingüística	***Ci***	**3**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,63**	**1,06**
	Cf	**3**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,50**	**0,93**
	Rt	**4**	**4**	**2**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2**	**4**	**1**	**3,00**	**1,20**
Comprender e interpretar mensajes acerca de las Ciencias	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,50**	**1,69**
	Cf	**3**	**4**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,75**	**1,49**
	Rt	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3,13**	**2,03**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos con contenido científico	***Ci***	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,13**	**1,55**
	Cf	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**5**	**4**	**1**	**3,13**	**1,46**
	Rt	**5**	**5**	**2**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,75**	**1,58**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la comunicación de ideas (saber decir)	***Ci***	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,13**	**1,55**
	Cf	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**3,00**	**1,31**
	Rt	**5**	**5**	**2**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,75**	**1,58**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción del conocimiento (saber hacer)	***Ci***	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
	Cf	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Saberes actitudinales: utilizar el lenguaje de forma razonada y dialogante en la regulación de conductas y emociones	***Ci***	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
	Cf	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**4,88**	**0,35**
	Rt	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Competencia en el tratamiento de la información y Competencia digital	***Ci***	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**

Aplicar las formas específicas del trabajo científico para buscar, recoger, seleccionar la información, procesarla y presentarla	***Ci***	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Utilizar las TIC para comunicarse, recabar información, visualizar situaciones, obtener y tratar datos	***Ci***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los resultados de las dos competencias que se analizan en la tabla anterior son más fáciles de interpretar:

Las pérdidas en la competencia en el tratamiento de la información y competencia digital se producen en todos los alumnos salvo Benito; éste y Clara son los únicos que después de la intervención pasaron a utilizar bastante más información que durante el periodo de cambio metodológico. Alfonso experimentó la evolución contraria: en la implementación de la segunda unidad didáctica se acentuó su tendencia a esperar que sus compañeras de grupo, Ana y Adela, estudiaran los supuestos solas, para después aprovechar él la extracción y tratamiento de datos que ellas hubieran hecho; esta falta de desarrollo de las formas del trabajo científico es la responsable de que sus resultados de ***Cf*** sean tan bajos. Posteriormente, durante la vuelta a la metodología tradicional, como ésta promueve el trabajo exclusivamente individual, es posible que Alfonso se viera más obligado a trabajar por sí mismo (al menos, ya al final de la fase de intervención, se observaba que Ana y Adela no parecían tan proclives a trabajar con él, y es posible que esta nueva actitud hacia Alfonso se mantuviera en el tiempo a medida que se acercaba la cuenta atrás para la Selectividad).

Los estudiantes de la muestra avanzaron en sus competencias lingüísticas, a pesar de que su utilización del lenguaje siguió siendo bastante deficiente en cuanto al vocabulario, la expresión de las ideas, la ortografía y la puntuación; pero generaban textos con mayor sistematización de ideas e incorporaron el vocabulario científico hasta un punto en el que se puede considerar aceptable, teniendo en cuenta el nivel de conocimientos inicial y la fuerza con la que se encuentran arraigadas en la expresión cotidiana las acepciones no científicas de las palabras "calor", "trabajo" y "energía". Benito es el único alumno cuya competencia (capacidad) en la comprensión e interpretación de mensajes en Ciencias experimenta pérdidas en dos meses, debido a su renuncia a responder de manera detallada las cuestiones de ***Rt***. Era consciente, según Rodrigo, de que iba a aprobar la materia de Química, y consideraba que con "responder por la mínima" ya era suficiente para él.

En cuanto a utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos de contenido científico y el *saber decir* lingüístico, parece que tanto el aprendizaje

realizado durante la intervención, como la posterior instrucción tradicional, ayudaron a consolidar la utilización del vocabulario científico.

Comparación de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia social y ciudadana	***Ci***	**4**	**2**	**2**	**4**	**1**	**1**	**4**	**2**	**4**	**4**	**1**	**3,25**	**1,04**
	Cf	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,83**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
Comprender y explicar de manera científica problemas de interés social	***Ci***	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,50**	**2,07**
	Cf	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,13**	**1,55**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Aplicar el conocimiento sobre debates esenciales para el avance de la Ciencia, para comprender cómo han evolucionado las sociedades y para analizar la sociedad actual	***Ci***	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**2,88**	**1,55**
	Cf	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,13**	**1,55**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Comportarse individualmente según las normas y valores democráticos, al relacionarse con los demás y afrontar los conflictos	***Ci***	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**4,00**	**0,00**
	Cf	**4**	**4**	**3**	**4**	**2**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**3,63**	**0,74**
	Rt	**4**	**4**	**3**	**4**	**1**	**1**	**4**	**3**	**4**	**4**	**1**	**3,75**	**0,46**
Cooperar y comprometerse en el trabajo científico y en las relaciones interpersonales	***Ci***	**3**	**3**	**2**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,75**	**0,46**
	Cf	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,63**	**0,52**
	Rt	**3**	**2**	**2**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,63**	**0,52**
Competencia en aprender a aprender	***Ci***	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**4,00**	**0,00**
	Cf	**4**	**3**	**3**	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**3,38**	**0,52**
	Rt	**4**	**3**	**3**	**4**	**1**	**1**	**3**	**3**	**3**	**4**	**1**	**3,38**	**0,52**
Iniciarse en el aprendizaje y ser capaz de continuarlo de manera autónoma (saber ser)	***Ci***	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
	Cf	**5**	**4**	**4**	**5**	**4**	**1**	**4**	**1**	**4**	**5**	**1**	**4,38**	**0,52**
	Rt	**5**	**4**	**4**	**5**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**5**	**1**	**4,38**	**0,52**
Desenvolverse ante las incertidumbres, tratar de buscar respuestas, admitir diversas soluciones ante un problema	***Ci***	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
	Cf	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**4,88**	**0,35**
	Rt	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Habilidad para organizar el tiempo de forma efectiva y perseverancia en el aprendizaje	***Ci***	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,00**
	Cf	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**

Como a lo largo de la Memoria de Tesis ya se ha hablado bastante de los aspectos actitudinales, el comentario sobre las competencias social y ciudadana, y aprender a aprender, es breve:

Todos los alumnos bajaron significativamente en sus niveles de competencia social y ciudadana a medida que pasaba el tiempo, se acababa el curso y se acercaban las PAAU. Estos alumnos afrontaron la adaptación a la nueva metodología con relativa buena disposición (si se tiene en cuenta que sus condicionantes actitudinales no eran demasiado favorables a un aprendizaje útil, significativo y avanzado de la ciencia escolar), pero a medida que pasaba el tiempo fueron manifestando una cierta dejadez generalizada en la realización de las actividades, porque veían que tenían que sostener el alto rendimiento cognitivo en todas las sesiones, y porque el curso avanzaba, y el final de su etapa en el Instituto estaba ya cerca. Parece que en la caída de los factores motivacionales hay dos aspectos que destacan claramente sobre los demás:

En primer lugar, estos alumnos se cansaban de trabajar las destrezas cognitivas de razonamiento y argumentación, que no consideraban importantes en el estudio de las Ciencias salvo a nivel profesional. Una de las expresiones más repetidas en las entrevistas realizadas a estos estudiantes era "si no me voy a dedicar a esto…", expresión que la autora de esta Memoria lleva tres años escuchando con asiduidad a sus propios alumnos. El énfasis que puso Rodrigo durante la intervención en resaltar la utilidad de las Ciencias en el desarrollo de las sociedades humanas y en la dimensión lúdica del ser humano ("la curiosidad") no parecía en absoluto motivar a estos estudiantes, que podían demostrar interés en un momento por un determinado tema, pero a manera de anécdota; pasado el momento, nuevamente se cansaban de tener que asimilar nuevos conocimientos con tanto esfuerzo como se les exigía.

El segundo problema de tipo emocional que se presentó consiste en un progresivo distanciamiento, por parte de los alumnos, con respecto a sus compañeros y a todo lo relacionado con el Centro (tareas de clase incluidas), a juicio de los profesores, parece que éste es un comportamiento social que se repite año tras año en los alumnos de 2º de Bachillerato, que en pocos meses "toman [nuevas] posiciones [afectivas]" (en palabras del profesor de Dibujo Técnico) y se preparan anímicamente para abandonar el Centro educativo y dejar de ver con asiduidad a los que fueron sus compañeros de Instituto. La competitividad con la que se afronta el último tramo del curso, el estrés de la cuenta atrás final y la pugna por tener mejores calificaciones que los demás para acceder con mayor seguridad a la carrera universitaria deseada o el ciclo de Fp elegido, también afectan las relaciones emocionales que se establecen dentro de los grupos de clase, y tienden a distanciar a los alumnos.

Nuevamente, los resultados del análisis por competencias concuerdan con los del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, y los de la fase de intervención y la caracterización final arrojan información concordante: a lo largo de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química, los alumnos

construyeron un conocimiento que se puede considerar aceptable, en tanto en cuanto demuestra avances con respecto a la situación inicial, aunque se han producido algunas pérdidas en los dos meses posteriores a la intervención en el aula. En todo caso, se puede considerar el aprendizaje realizado es insuficiente para un curso preuniversitario, en cuanto a la movilización del conocimiento de la ciencia escolar para describir e interpretar los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos. La expresión de las ideas es todavía descuidada en general, a pesar de que los alumnos han interiorizado el lenguaje científico en lo esencial, y las actitudes de al menos tres alumnos son totalmente inadecuadas para el desarrollo de un aprendizaje significativo, reflexivo y que genere satisfacción personal y curiosidad por el conocimiento de la Ciencia y sobre la Ciencia.

Se confirma que el trabajo en un entorno colaborativo favorece la construcción de nuevas ideas. Esto sucede para los alumnos del grupo G_A y en la colaboración entre Clara y Darío; y el caso más claro es el de Benito, cuyos resultados mejoran desde el momento en que entra a trabajar con los otros dos grupos y se aleja de su grupo de origen, G_B, en el que Berta aparece y desaparece intermitentemente, y Brais se resiste a cooperar.

Conclusiones de la investigación (pág. 1219). Con el propósito de ofrecer una visión global del proceso, se establecen las conclusiones del trabajo de investigación, que se derivan del conjunto de las conclusiones relativas a todas y cada una de las hipótesis de la investigación (expuestas en los ***Capítulos III-VII***). Las conclusiones de la investigación tratan sobre el proceso de aprendizaje observado, las propuestas didácticas ensayadas y los instrumentos de análisis utilizados en la investigación.

Implicaciones de la investigación (pág. 1235). Sobre la base de las conclusiones emitidas, se exponen una serie de implicaciones para la enseñanza y diversas reflexiones sobre las dos propuestas ensayadas, incluyendo algunas sugerencias para su revisión y adecuación a los contextos de aula.

Nuevos problemas de investigación que podrían ser la base de futuros trabajos (pág. 1237). El ***Capítulo VIII*** finaliza con la formulación de nuevas vías de investigación que pueden servir de planteamiento para futuros trabajos.

VIII.2. Recapitulación de los resultados de la investigación

Hemos considerado conveniente comenzar este capítulo sintetizando los principales resultados de la investigación, que han permitido realizar el contraste de las hipótesis de trabajo.

En esta Tesis se ha presentado una experiencia real, mediante la que se han estudiado los efectos de una unidad didáctica sobre Termodinámica Química en las formas de hacer y de pensar de una muestra de once estudiantes de 2º de

Bachillerato. Las hipótesis de la investigación hacen referencia al conocimiento inicial de los alumnos (antes de la implementación de la unidad didáctica ensayada) y a los conocimientos finales a corto y medio plazo después de la misma, con la finalidad de detectar las diferencias producidas en el conocimiento de los estudiantes como consecuencia de su interacción con la metodología. El diseño de la investigación incluyó una fase previa a la intervención, durante la cual se implementó una unidad didáctica sobre Termoquímica, con dos finalidades: en primer lugar, minimizar el impacto del cambio metodológico en el proceso de aprendizaje que se pretendía evaluar (el relacionado con la segunda unidad didáctica), y en segundo lugar, explorar cómo se realizó la construcción de los conocimientos conceptuales y procedimentales que se consideran básicos en el aprendizaje de los aspectos de la Termodinámica Química.

Así pues, durante la fase previa a la intervención, el profesor y los estudiantes se habituaron a trabajar con la nueva metodología y estudiaron los contenidos que hemos considerado necesarios antes de la aplicación de la propuesta didáctica ensayada (contenidos seleccionados mediante un análisis epistémico y un análisis curricular del conocimiento a enseñar).

Según la metodología propuesta, la secuencia de enseñanza ensayada integra los contenidos conceptuales y procedimentales, y busca la promoción de las destrezas cognitivas, el conocimiento epistemológico-científico y las destrezas sociales y de comunicación. Para implementar la secuencia en el aula se diseñaron materiales curriculares que constituyeron el cuaderno de trabajo de los estudiantes.

La dinámica de trabajo que se desarrolló en el aula logró una participación lo más activa posible del profesor (colaborador en esta investigación y satisfecho con las innovaciones metodológicas realizadas) y los alumnos, aunque algunos de éstos mantuvieron unas actitudes negativas hacia el aprendizaje de las Ciencias (y de otras materias, como han revelado los profesores de Lengua y Literatura Castellana, Lengua y Literatura Gallega, Francés, Filosofía e Historia). El trabajo cooperativo logrado fue fundamental en la construcción de nuevos significados y la adquisición de nuevas destrezas de la ciencia escolar.

Los instrumentos de recogida y tratamiento de la información seleccionados permitieron un seguimiento continuo del proceso de aprendizaje y la evaluación del conocimiento en determinados momentos clave de la investigación, para determinar qué conocimientos tenían los alumnos antes de implementarse la segunda secuencia didáctica, qué conocimientos tenían inmediatamente después de ésta, y qué conocimientos permanecieron al cabo de un cierto tiempo (dos meses). las estrategias de tratamiento de la información han permitido hacer explícitos los esquemas de razonamiento y acción de los estudiantes en distintos momentos de la parte experimental, y poner de manifiesto las competencias que movilizaron los alumnos a medida que dieron respuesta a las cuestiones planteadas.

VIII.2.1. Resultados obtenidos mediante el método de análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción

En los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII*** se han expuesto detalladamente los esquemas de razonamiento y acción idiosincrásicos que activaron los alumnos como consecuencia de la interacción con las dos unidades didácticas ensayadas: *Termoquímica* y *Termodinámica Química*. A continuación se ofrecen unas tablas en las que se resumen, para cada esquema de razonamiento y acción, los principales datos mediante los que se puede concluir hasta qué punto los once estudiantes de la muestra construyeron esquemas de razonamiento y acción deseables de la ciencia escolar que permanecieran estables el tiempo suficiente como para considerar que son fruto de un aprendizaje significativo. Para cada ***ER*** y ***EA*** (incluidos los macroesquemas ***ERT*** y ***EAT***) se indica el número total de relaciones del esquema, qué número de relaciones se pretendía activar en cada momento de la evaluación de conocimientos y cuántas relaciones utilizaron los estudiantes en sus respuestas a las actividades o pruebas planteadas. Además, con la finalidad de reflejar el aprendizaje alcanzado por los once adolescentes de la muestra como consecuencia de la interacción con la metodología ensayada, las tablas que vienen a continuación detallan los valores de dos indicadores, para el conjunto de la muestra estudiada:

En primer lugar, se utiliza el porcentaje de activación (***%Act***), para mostrar qué fracción de las relaciones fueron adecuadamente activadas (✓) en los distintos esquemas de razonamiento y en el macroesquema ***ERT***. El porcentaje de activación de un esquema se define como la cantidad porcentual de relaciones activadas, frente al número total de relaciones del esquema.

En segundo lugar, se utiliza el porcentaje de adquisición (***%Adq***), para mostrar qué fracción representan las relaciones adecuadamente activadas (✓) con respecto a las que sería deseable que utilizaran en la fase previa, para los distintos esquemas de razonamiento y en el macroesquema ***ERT***. El porcentaje de adquisición asociado a un esquema se define como la cantidad porcentual de relaciones activadas, frente al número de relaciones que se esperaban utilizar a lo largo de la fase previa (cantidad que se ha estimado mediante la resolución de las actividades por parte de expertos, en este caso, los investigadores).

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER1**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	59	59	59	59	59	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	54	54	58	58	58	4	4	0
Nº de relaciones activadas por los	51	46	51	44	42	–2	–4	–2

alumnos								
% Activación	**86**	**78**	**86**	**75**	**71**			
% Adquisición	**94**	**85**	**88**	**76**	**72**			

Los datos de la tabla anterior muestran que las actividades de las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron éxito en la adquisición, a medio plazo, del 72% de las relaciones que era deseable que se activaran para la descripción de los sistemas termodinámicos. La eficacia de la instrucción realizada en el aula fue de prácticamente el 100% de relaciones esperables para el esquema ***ER1*** (58 relaciones de 59), porque a lo largo de la intervención se trataron todas las ideas de la ciencia escolar salvo la definición microscópica de la entropía en relación con la probabilidad de los microestados de energía del sistema. El dato más llamativo de la tabla se corresponde con la diferencia de activación entre las caracterizaciones final e inicial: en ***Cf*** se utilizaron dos relaciones menos que en la caracterización inicial, aunque se esperaba que se pudieran activar hasta 4 más. Este dato se explica por la tendencia de los alumnos a no describir en lo posible los sistemas termodinámicos; de hecho, de ***Ci*** a ***Cf*** se observa que dejan de clasificar los sistemas en función de sus interacciones con el entorno, y prefieren caracterizar los estados utilizando las magnitudes termodinámicas básicas y principales. Entre la caracterización final y la retención apenas se producen pérdidas. Por lo tanto, se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***ER1*** acordes con las ideas de la ciencia escolar.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER2**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	61	61	61	61	61	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	58	58	61	61	61	3	3	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	51	32	49	25	27	–7	–5	2
% Activación	**84**	**52**	**80**	**41**	**44**			
% Adquisición	**84**	**55**	**80**	**41**	**44**			

Las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron éxito en la adquisición, a medio plazo, del 44% de las relaciones, lo que se puede considerar un valor cercano al mínimo deseable (50%, la mitad del esquema) para la descripción de los procesos termodinámicos. Obsérvese que la eficacia de la instrucción durante las fases previa y de intervención fue muy elevada, pero decayó en las pruebas de caracterización. Estos datos no se deben a que los alumnos sólo fueran capaces de activar las relaciones de ***ER2*** con ayuda del profesor, sino a que tendían a responder en pocas palabras las cuestiones que se les formulaban, y (como sucede con ***ER1***) las relaciones de un esquema descriptivo no les parecían suficientemente interesantes

como para volcarlas en las pruebas escritas. La retención muestra que a los dos meses los estudiantes mantenían en la memoria las relaciones aprendidas, y de hecho activaron 2 más que en la caracterización final, que tuvo lugar ocho semanas antes de ***Rt***. Entre la caracterización final y la retención apenas se producen pérdidas. De estos datos se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***ER2*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión aceptable, pero no los convencieron de su utilización hasta un punto deseable.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER3**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	52	52	52	52	52	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	29	29	52	52	52	23	23	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	27	18	49	34	29	–14	2	-5
% Activación	**52**	**35**	**94**	**65**	**56**			
% Adquisición	**93**	**62**	**94**	**65**	**56**			

La adquisición de ***ER3*** a medio plazo fue del 56% de las relaciones, aceptable, pero con reservas:

Durante la fase previa, los alumnos activaron la inmensa mayoría de las relaciones que se esperaban (93%), que representaban más o menos la mitad del esquema referencial (52%) sobre la interpretación de los procesos termodinámicos; en las pruebas de caracterización inicial se reveló que llegaban a utilizar de manera autónoma unos dos tercios del ***ER3*** construido. Después de la fase de intervención, en la que construyeron el esquema casi al completo, la activación volvió a caer en dos tercios, y se produjo una cierta pérdida en los dos meses siguientes a ***Cf***, con lo que el número de relaciones activadas vuelve a los valores de ***Ci***. Al comparar los esquemas correspondientes a ***Ci*** y ***Rt***, se observa que se produjo un cierto olvido en las relaciones que tienen que ver con la conceptualización de la temperatura y con el vínculo entre la diferencia de temperatura entre estados y la liberación de la energía al exterior. Estas relaciones tardaron en construirse, y en ocasiones no se aplicaban adecuadamente porque los alumnos adoptaban un punto de referencia no válido, como sucedió en el caso de la clasificación de los cambios de estado de agregación del agua: varios consideraban que los cambios de estado progresivos son exotérmicos porque "hay que suministrar energía al sistema", lo que científicamente expresa que el sistema absorbe energía por calor y por lo tanto el proceso es endotérmico; pero ellos interpretaban esta afirmación en términos de un aumento de temperatura del sistema (y no del entorno), y asociaban éste a la exotermia.

A cambio, se construyeron bastantes relaciones que tienen que ver con las magnitudes termodinámicas principales.

De los resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***ER3*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que resulta aceptable dado el nivel inicial de conocimientos de los estudiantes, pero que todavía se encontraban en un estado de consolidación y necesitaban de más tiempo para afianzarse como esquemas útiles en la interpretación de situaciones y fenómenos.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento **ER4**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	43	43	43	43	43	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	18	18	41	41	41	23	23	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	20	12	39	16	18	4	6	2
% Activación	**47**	**28**	**91**	**39**	**44**			
% Adquisición	**111**	**67**	**95**	**39**	**44**			

La adquisición de ***ER4*** a medio plazo estuvo cerca del mínimo aceptable. Al principio de la fase experimental, los alumnos llegaron a utilizar más relaciones que las que se pretendían construir, pero en sus respuestas a las pruebas de caracterización siempre tendieron a marginar sus conocimientos sobre la Termodinámica de los procesos químicos como disciplina de las Ciencias. No es un resultado sorprendente, si se tiene en cuenta que estos estudiantes estaban acostumbrados al aprendizaje en metodologías de tipo tradicional, que tienden a eclipsar los aspectos epistemológicos; además, los propios alumnos preferían centrarse en la realización del mínimo esfuerzo posible para responder las cuestiones planteadas, así que a menos que se diseñaran *ad hoc* algunas pruebas para verificar estos conocimientos, no los exteriorizarían voluntariamente. En la batería de retención se incluyó una cuestión (*Rt05*) encaminada precisamente a indagar en estos aspectos, y los resultados pueden considerarse aceptables aunque no lleguen al 50%, por dos razones: en primer lugar, porque no se alejan significativamente del 50%, y en segundo lugar, porque la activación de relaciones es superior a la demostrada en ***Cf*** y exactamente la mitad de la exteriorizada en ***Fi*** (con la ayuda del profesor). De estos resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***ER4*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que podemos calificar como aceptable, aunque no se logró que los estudiantes prestaran suficiente atención a los aspectos epistemológicos del conocimiento sobre Termodinámica, ni se percibió en ellos un interés manifiesto o motivación por hacer útiles sus nuevas

ideas al respecto.

La adquisición de ***ER5*** a medio plazo estuvo también cerca del mínimo aceptable, y la construcción de las relaciones sobre los modelos de partículas, enlace químico y reacción química fue un logro de la metodología ensayada:

Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de razonamiento ***ER5****, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	29	29	29	29	29	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	15	15	26	26	26	11	11	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	8	0	16	17	12	17	12	-5
% Activación	**28**	**0**	**55**	**59**	**41**			
% Adquisición	**53**	**0**	**62**	**65**	**46**			

Al principio de la fase experimental, los alumnos apenas utilizaban ideas científicas del dominio microscópico, aunque se esforzaron por activar relaciones sobre las partículas para justificar y predecir el comportamiento de los sistemas materiales. Sin embargo, desde el momento en que las relaciones microscópicas pasaron a formar parte de los contenidos que estudiar, los alumnos perdieron por completo el moderado entusiasmo que habían mostrado antes, y en la caracterización inicial no activaron una sola relación sobre los modelos embrionarios de partículas, enlace químico y reacción química que habían construido. A lo largo de la fase de intervención, gracias a la introducción del concepto de desorden termodinámico y su estimación mediante la entropía de los sistemas, los estudiantes se interesaron nuevamente por responder las cuestiones basándose en modelos de partículas, aunque éstos eran sencillos y fragmentarios. A la hora de volcar sus conocimientos de manera autónoma en respuesta a pruebas de caracterización, tuvieron buen desempeño en ***Cf*** (ninguna pérdida con respecto a la fase de intervención, en la que contaban con ayuda del experto), pero las pérdidas que se produjeron en dos meses son significativas, lo que demuestra que los modelos construidos no estaban consolidados. En los esquemas ***ER5*** de ***Rt***, los estudiantes utilizaron solamente aquellas relaciones conceptuales de las que estaban seguros, las cuales se limitan a los modelos de partículas; los de enlace y reacción química apenas figuran en sus respuestas.

De los resultados mostrados en los ***Capítulos*** del ***III*** al ***VII*** se concluye que las unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de unos esquemas ***ER5*** que podemos considerar embrionarios para el nivel de 2º de Bachillerato. Es hasta cierto punto un logro que se construyeran estos esquemas,

pero la falta de confianza de los estudiantes en sus conocimientos y la tendencia a ocultarlos no ayuda a que los esquemas evolucionen en complejidad.

A modo de resumen, se comenta cómo progresó la adquisición de ***ERT*** a como consecuencia de la aplicación de la metodología ensayada:

*Resumen de los datos porcentuales para los macroesquemas de razonamiento **ERT**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE RAZONAMIENTO	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	244	244	244	244	244	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	174	174	238	238	238	64	64	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	157	108	204	136	128	28	20	-6
% Activación	**64**	**44**	**84**	**56**	**52**			
% Adquisición	**90**	**62**	**86**	**57**	**54**			

La activación de esquemas de razonamiento se puede considerar aceptable en su conjunto, porque los alumnos llegaron a utilizar el 54% del ***ERT*** que se pretendía construir (sin contar las relaciones sobre Termodinámica Estadística y mecanocuántica, que suponen 6 relaciones menos en el esquema). La utilización autónoma de los conocimientos rondó el 60% en las caracterizaciones inicial y final, y a medio plazo se produjeron pérdidas no significativas en el conjunto de los esquemas de razonamiento construidos. Los esquemas de los alumnos contienen muchas relaciones sobre la descripción de los sistemas materiales utilizando las magnitudes termodinámicas básicas y principales (***ER1***), junto con la interpretación de los aspectos energéticos de los procesos utilizando las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales (***ER3***); pero los razonamientos elaborados no alcanzaron una profundidad deseable para el nivel de 2º de Bachillerato, porque la construcción de los modelos de la Química (***ER5***) y la conciencia de la naturaleza de la Termodinámica como disciplina(***ER4***) no son tan ricas en conexiones entre elementos del esquema. De los resultados se concluye que las unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de unos esquemas de razonamiento aceptables, cuyo aprendizaje se puede considerar significativo, puesto que se mantuvo dos meses en el tiempo.

En cuanto a los esquemas de acción, se resumen a continuación los resultados de ***%Act*** y ***%Adq*** que se obtuvieron para las distintas etapas de la parte experimental de la investigación:

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción **EA1**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	41	41	41	41	41	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	35	35	41	41	41	0	0	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	35	31	41	38	36	7	5	–2
% Activación	**85**	**76**	**100**	**93**	**88**			
% Adquisición	**100**	**89**	**100**	**93**	**88**			

Los datos de la tabla anterior muestran que las actividades de las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron éxito en la adquisición, a medio plazo, de casi el 90% de las relaciones que era deseable que se activaran para la identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos. Los porcentajes de adquisición son muy elevados en todos los momentos en los que se evaluó el conocimiento procedimental, y la pérdida que se produjo en los dos meses que transcurrieron entre ***Cf*** y ***Rt*** no es significativa (<10%). La utilización autónoma de las ideas de la ciencia escolar es casi comparable a la que demostraron los alumnos con ayuda del profesor, lo que indica que las destrezas y estrategias que se construyeron en ***EA1*** se encontraban casi plenamente en la zona de desarrollo real de los estudiantes. Por lo tanto, se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***EA1*** acordes con las ideas de la ciencia escolar.

Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción ***EA2****, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	40	40	40	40	40	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	34	34	40	40	40	6	6	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	34	25	39	36	26	11	1	-10
% Activación	**85**	**63**	**98**	**90**	**65**			
% Adquisición	**100**	**74**	**98**	**90**	**65**			

Las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* tuvieron un éxito aceptable en la adquisición, a medio plazo, del 65% de las relaciones para la representación algebraica, léxica e icónica de los aspectos termodinámicos. La eficacia de la instrucción durante las fases previa y de intervención fue muy elevada, pero decayó en las pruebas de caracterización salvo en ***Cf***; estos datos indican que las destrezas que se construyeron estaban en consolidación en el momento en que se implementó ***Ci***, y que se necesitaron más sesiones de trabajo (***Fi***) hasta que los estudiantes fueran capaces de utilizar las relaciones construidas de manera autónoma. Las pérdidas que se produjeron en los dos meses siguientes son

elevadas, y devuelven los porcentajes de activación y adquisición a los valores que tenían en la caracterización inicial. En los esquemas de ***Rt*** se observan dificultades relacionadas con la conceptualización de la temperatura (absoluta) y la entropía, y en la consistencia en la simbología; la utilización de las unidades de medida adecuadas no se generalizó tanto como hubiera sido deseable. Sin embargo, la incorporación del léxico científico no es insignificante, si se tiene en cuenta que estos alumnos tenían un vocabulario pobre y descuidado, y dificultades en la redacción ordenada y sistemática de sus ideas. Los avances en la realización de operaciones matemáticas relacionadas con los aspectos energéticos son también notables, en estudiantes que tenían grandes dudas sobre la selección de las operaciones aritméticas básicas para calcular cantidades como la diferencia de temperaturas entre los valores correspondientes a los estados inicial y final.

Dado que los resultados de la retención indican pérdidas significativas, se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas ***EA2*** acordes con las ideas de la ciencia escolar a corto plazo, pero las destrezas y estrategias trabajadas no se consolidaron lo suficiente como para que en dos meses no se produjeran retrocesos significativos en el desempeño.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción **EA3**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	***Fp***	***Ci***	***Fi***	***Cf***	***Rt***	***Diferencia Cf – Ci***	***Diferencia Rt – Ci***	***Diferencia Rt – Cf***
Nº de relaciones del esquema	39	39	39	39	39	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	33	33	39	39	39	6	6	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	33	27	26	27	28	0	1	1
% Activación	**85**	**69**	**67**	**69**	**72**			
% Adquisición	**100**	**82**	**67**	**69**	**72**			

La adquisición de ***EA3*** a medio plazo fue del 72% de las relaciones sobre la representación gráfica de los aspectos termodinámicos, lo que constituye un resultado bueno, que además se mantuvo estable en el tiempo hasta un punto en el que los datos de la retención muestran una relación más que los de la caracterización final. Durante la fase previa, los alumnos activaron todas las relaciones que se esperaban, aunque la ayuda del profesor fue muy necesaria, dada la cantidad de dificultades que se presentaron. Los alumnos, de hecho, utilizaron unas cuatro quintas partes de sus conocimientos en la caracterización inicial. Durante la fase de intervención ya no construyeron todas las relaciones que se deseaban, sino que se limitaron a poner en juego las estrategias y destrezas que ya habían sido capaces de utilizar de manera autónoma en ***Ci***. Los resultados de las pruebas de caracterización final y retención confirman que los alumnos continuaron utilizando el mismo número de relaciones hasta dos meses después de la

intervención, rasgo indicativo de que los conocimientos procedimentales adquiridos se aprendieron de manera significativa.

Así pues, de los resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***EA3*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que resulta aceptable dado el nivel inicial de conocimientos de los estudiantes sobre la interpretación y realización de representaciones gráficas que sean útiles en la interpretación de los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos.

*Resumen de los datos porcentuales para los esquemas de acción **EA4**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	66	66	66	66	66	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	59	59	66	66	66	7	7	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	59	43	58	52	35	9	-6	-17
% Activación	**89**	**65**	**88**	**52**	**53**			
% Adquisición	**100**	**73**	**88**	**79**	**53**			

La adquisición de ***EA4*** a medio plazo se puede considerar aceptable (53%), aunque se observan pérdidas en los dos meses entre ***Cf*** y ***Rt***, debidas a que las destrezas y estrategias sobre la resolución de problemas estaban en proceso de consolidación. En la fase previa, los alumnos utilizaron todas las relaciones que se pretendían construir, pero nuevamente en sus respuestas a las pruebas de caracterización pusieron en juego las tres cuartas partes del conocimiento procedimental trabajado. En la fase de intervención se observa el mismo efecto que en ***EA3***: los alumnos se limitaron a poner de manifiesto las destrezas y estrategias que estaban afianzando, sin utilizar relaciones nuevas. En ***Cf*** se observan pérdidas, por la ausencia de la ayuda del profesor en la elaboración de respuestas. En esta tesitura, algunas de las destrezas y estrategias se olvidaron, y dos meses después se produjeron retrocesos significativos en su puesta en juego. En todo caso, los esquemas ***EA4*** son aceptables si se tiene en cuenta que se construyó el 53% de las relaciones que se trabajaron en el aula.

De estos resultados se concluye que las dos unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a iniciar la activación de esquemas ***EA4*** acordes con las ideas de la ciencia escolar en una extensión que podemos calificar como aceptable.

*Resumen de los datos porcentuales para los macroesquemas de acción **EAT**, a lo largo de la fase experimental de la investigación*

ESQUEMA DE ACCIÓN	*Fp*	*Ci*	*Fi*	*Cf*	*Rt*	*Diferencia Cf – Ci*	*Diferencia Rt – Ci*	*Diferencia Rt – Cf*
Nº de relaciones del esquema	186	186	186	186	186	0	0	0
Nº de relaciones que se esperaba activar	161	161	186	186	186	25	25	0
Nº de relaciones activadas por los alumnos	161	126	164	153	125	27	-1	-28
% Activación	**87**	**68**	**88**	**82**	**67**			
% Adquisición	**100**	**78**	**88**	**82**	**67**			

A modo de resumen, se comenta cómo progresó la adquisición de ***EAT*** como consecuencia de la aplicación de la metodología ensayada:

La activación de esquemas de acción se puede considerar aceptable en su conjunto, porque los alumnos llegaron a utilizar los dos tercios del ***EAT*** referencial que se llevó al aula. La utilización autónoma de los conocimientos ronda un 80% en las caracterizaciones inicial y final, pero a medio plazo se produjeron pérdidas significativas en el conjunto de los esquemas de acción construidos, aunque en todo caso los valores final de activación son aceptables.

De los resultados se concluye que las unidades didácticas ensayadas ayudaron a los alumnos a activar esquemas de acción aceptables, pero cuyo aprendizaje no se puede considerar significativo, puesto que no se mantuvo dos meses en el tiempo, porque las destrezas y estrategias no pudieron consolidarse en las sesiones que se llevaron a cabo. Estos resultados se pueden relacionar con la hipótesis que planteó Domínguez (2000) en las conclusiones de su investigación: parece que los esquemas de acción se construyen más lentamente que los de razonamiento; quedaría por determinar si su influencia es efectivamente más duradera, aunque la estabilidad de los resultados de los ***EA***s parece apuntar también en esta dirección.

VIII.2.2. Resultados obtenidos mediante el método de análisis del aprendizaje por competencias

En las cuatro tablas que vienen a continuación se resumen los niveles que alcanzaron los alumnos en las seis competencias evaluadas, en las distintas caracterizaciones de la muestra: inicial (***Ci***), final (***Cf***) y retención (***Rt***). Se muestran además el promedio de los niveles y la desviación típica para el conjunto de los alumnos que se presentó a cada una de las caracterizaciones:

En la caracterización inicial, se presentaron ocho alumnos, todos menos Carlos, Berta y Débora. En la caracterización final, faltaron Berta, Diana y Débora, con lo cual la muestra también estuvo compuesta de ocho individuos. En la retención, los alumnos presentados volvieron a ser los mismos que en la caracterización inicial.

Dado que la muestra objeto de estudio es de pequeño tamaño, no es

necesario realizar un contraste estadístico entre las distintas caracterizaciones; por otra parte, la elevada muerte muestral (3-4 alumnos de 11) devalúa más el interés de analizar estadísticamente los resultados obtenidos. Se puede dar por cierto que la composición de la muestra varió entre los distintos momentos en los que se realizaron las evaluaciones del conocimiento, aunque es previsible que apenas se detectaran cambios en los parámetros estadísticos, porque los resultados de los alumnos que se ausentaron son en todos los casos muy bajos, así que, en la práctica, para todas las caracterizaciones se incluirían los resultados de los 7 alumnos que asistieron a todos los momentos de evaluación, y quedarían fuera de la muestra los datos de Carlos, Berta, Diana y Débora. Hay que destacar que de estos cuatro alumnos, tres repitieron 2º de Bachillerato el curso siguiente: Carlos, Diana y Débora; su profesor de Química volvería a ser Rodrigo.

Los resultados de los parámetros estadísticos que se recogen en las tablas siguientes están calculados para los ocho alumnos que se presentaron en cada caso a las pruebas de caracterización correspondientes. Para interpretar las tablas, debe recordarse que los niveles de las distintas competencias se han calculado con respecto a dos valores referenciales VRC_1 y VRC_2 (ver ***Volumen A***), que representan distintos valores de potencialidad de interpretación, potencialidad de activación y grado de utilidad en la resolución de cuestiones problemáticas, atribuidos a los conocimientos de la ciencia escolar mediante la resolución de las pruebas y actividades por parte de los expertos (investigadores). VRC_1 es el mínimo valor adecuado, y VRC_2 se considera un valor elevado, a partir del cual los alumnos ofrecen respuestas comparables a las de los expertos. Así pues, un aumento en el nivel de competencia a lo largo del tiempo indicaría que el alumno avanzó más de lo que se esperaba en comparación con las ideas de la ciencia escolar que se le pedía que movilizara; y un retroceso en el nivel de competencia indicaría que el estudiante no desarrolló a tiempo todas las destrezas y estrategias en la movilización del conocimiento en la extensión que se le pedía. Si el nivel de competencia de un alumno se mantiene constante a lo largo de los diferentes momentos de la evaluación, quiere decir que sus conocimientos conceptuales y procedimentales avanzaron paralelamente a lo que era de prever, según la transposición didáctica realizada y la planificación prevista para la construcción de conocimientos.

Comparación de los niveles de competencia científica que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en el conocimiento e interacción con el mundo físico	***Ci***	**3**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,93**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,75**	**0,89**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**

Identificación de cuestiones científicas	***Ci***	**4**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2**	**4**	**1**	**2,75**	**1,39**
	Cf	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,38**	**1,51**
	Rt	**2**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,00**	**0,76**
Explicación científica de los fenómenos	***Ci***	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
	Cf	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Utilización de pruebas científicas	***Ci***	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,25**	**0,89**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1,75**	**1,04**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Actitudes hacia la Ciencia	***Ci***	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,55**	**0,50**
	Cf	**2**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,55**	**0,50**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1,55**	**0,50**

En la tabla anterior se observa que, redondeando los resultados, los alumnos presentados a las pruebas alcanzaron un nivel promedio NC_2 en la competencia científica en las tres caracterizaciones, pero se observan pérdidas para dos alumnos entre las caracterizaciones inicial y final (Alfonso y Adela), y para otros dos (Ana y Clara) entre la final y la de retención. Los valores de competencia de tres de estos estudiantes, a pesar de las pérdidas, siguen siendo aceptables dos meses después, pero en el caso de Clara la regresión la deja en el nivel mínimo de competencia, junto con los alumnos que presentaron problemas actitudinales.

El retroceso en el nivel de las competencias (capacidades) de identificación de cuestiones científicas y utilización de pruebas científicas tiene su explicación en el abandono de la metodología después de la fase de intervención, a favor de una instrucción de tipo tradicional que permitiera trabajar más rápido en el "adiestramiento" para los exámenes de Selectividad. Durante los dos meses siguientes a la intervención, al no poner en práctica con la misma intensidad las destrezas y estrategias en la resolución de cuestiones de base científica (destrezas y estrategias que además estaban en un momento de consolidación), los niveles de competencia se resintieron.

Las causas del retroceso en los niveles de competencia de los cuatro alumnos citados en el párrafo anterior, son las siguientes:

En el caso de Ana, las pérdidas se producen en la identificación de cuestiones científicas y en la utilización de pruebas, una vez que pasaron dos meses desde la intervención. Recuérdese que esta alumna tenía un estilo de aprendizaje marcadamente memorístico, y que tendía a focalizar su interés en la realización "correcta" de los cálculos y en la presentación de los guiones de trabajo; su ansiedad por estos aspectos se demuestra en que repasaba tres o cuatro veces cada operación que hacía con la calculadora, y en que pasaba a limpio todos sus apuntes cada día. En el mes de mayo, Ana estaba completamente volcada en preparar los exámenes de Selectividad (en los que obtendría muy buenas calificaciones, en la convocatoria de junio), y sus respuestas a las pruebas de retención reflejan la "prisa" por responder inmediatamente a las preguntas planteadas, ciñéndose a los pocos datos que se puedan extraer en una lectura rápida de la cuestión. La vuelta a una metodología de

tipo tradicional afectó a su nivel de competencia (capacidad) en la identificación de cuestiones científicas, porque Ana pasó a centrar su atención en ofrecer una solución rápida a las preguntas planteadas sin reflexionar sobre ellas.

Los resultados de Alfonso caen en la fase de caracterización final y se recuperan en la de retención, porque este alumno siempre tendía a posponer el aprendizaje hasta el último momento. Recuérdese que, en sus interacciones en pequeño grupo, prefería que sus compañeras buscaran las soluciones a las cuestiones planteadas, para después pulirlas él y verter las respuestas en los guiones de trabajo. Cuando Rodrigo anunció que los resultados de la batería de caracterización final contarían para la calificación del trimestre en vez de celebrarse el examen tradicional, Alfonso no pareció reaccionar ante la noticia, y no "preparó la materia" (en palabras del profesor) porque no consideraba que el desempeño en sus respuestas a las pruebas se fuera a evaluar "de verdad". En el caso de la retención, a la que Rodrigo adjudicó un valor de 2 puntos sobre 10 en la calificación final del tercer trimestre, Alfonso ya estaba sobre aviso de que el profesor efectivamente evaluaría sus respuestas, y se esmeró en responderlas con seriedad. Puesto que los niveles de competencia se han calculado con respecto a los niveles referenciales de la ciencia escolar, el hecho de que Alfonso se mantenga en el nivel $\boldsymbol{NC_2}$ entre ***Ci*** y ***Rt*** revela que continuó avanzando en sus competencias paralelamente al nivel de conocimientos que se le pedía que movilizara.

El retroceso en los resultados de Adela están claramente ligados a la enfermedad que padecía esta chica: el descenso en el nivel global de competencia científica se produce entre ***Ci*** y ***Cf***, en lo que revela que Adela tuvo dificultades para asimilar adecuadamente en pocas sesiones los conocimientos de la ciencia escolar sobre Termodinámica; pero aunque su nivel de competencia cae en una unidad, se mantiene por encima del de varios de sus compañeros, y se puede considerar perfectamente aceptable. Tuvo dificultades para construir explicaciones científicas en sus respuestas a las pruebas de caracterización final, pero obsérvese que en la retención su nivel de competencia (capacidad) vuelve a ser adecuado. Estos datos indican que, con el tiempo, Adela continuó consolidando los conocimientos que había aprendido a lo largo de la intervención, y que pasados dos meses seguía siendo capaz de utilizarlos, incluso para responder a cuestiones más abstractas que las presentadas inmediatamente después de la instrucción (las pruebas de ***Rt*** son más conceptualmente demandantes que las de ***Cf***). Las pérdidas que experimentó el nivel de competencia científica de Adela en las otras dos competencias (capacidades), es decir, identificación de cuestiones científicas y utilización de pruebas, sí se produjeron entre ***Cf*** y ***Rt***, se deben a la instrucción de tipo tradicional que se realizó en los dos meses siguientes a la fase experimental de la investigación.

En cuanto a Clara, se trata de una alumna con baja autoestima, que tuvo bastantes dificultades con el estudio de todas las materias de 2º de Bachillerato. Le

costaban especialmente las asignaturas "de Letras" (en sus propias palabras), elaborar comentarios de texto y "estudiarse la teoría de Historia"; para intentar potenciar la memorización de los contenidos de esta asignatura, recurría a teatralizaciones mentales de los sucesos históricos, por ejemplo, imaginándose a su propia madre en el papel de Isabel *la Católica*. Según Rodrigo, ésta es una alumna que "estudia mucho, pero no le… no le cunde". Su nivel de competencia en la utilización de pruebas científicas se resintió durante el desarrollo de los contenidos de Termodinámica Química, debido a la rapidez de la introducción de los conceptos y modelos de la ciencia escolar. Precisamente una de las características que más valoraba esta alumna de la nueva metodología es que "había más tiempo para pensar", y la vuelta a la instrucción tradicional parece tener mucho que ver en el descenso que se observa en sus niveles de competencia en la identificación y en la explicación de cuestiones científicas.

Comparación de los niveles de competencia matemática que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Braís	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia matemática	***Ci***	**4**	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,88**	**1,64**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,13**	**0,35**
Identificar situaciones que exigen conocimientos matemáticos para expresar o interpretar los fenómenos	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**4**	**5**	**1**	**3,50**	**1,85**
	Cf	**5**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,25**	**1,98**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**1**	**1,88**	**0,64**
Utilizar el lenguaje matemático para cuantificar aspectos relacionados con los fenómenos naturales	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**4**	**5**	**1**	**3,63**	**1,77**
	Cf	**5**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,25**	**1,98**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
Utilizar técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar datos e ideas	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,50**	**2,07**
	Cf	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,38**	**0,52**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
Realizar cálculos sobre los fenómenos naturales	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,63**	**1,92**
	Cf	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,63**	**0,52**
Realizar representaciones gráficas sobre fenómenos naturales	***Ci***	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,50**	**1,41**
	Cf	**1**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,50**	**1,41**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1,50**	**1,07**

Se observan pérdidas en el nivel de competencia matemática para todos los alumnos que se presentaron a las pruebas, aunque hay que matizar estos resultados:

Entre las pruebas de caracterización inicial y final, las pérdidas se producen en tres alumnos: Ana, Adela y Darío, y se deben a la caída espectacular en la utilización de técnicas matemáticas para calcular, representar e interpretar datos y en la realización de cálculos sobre fenómenos naturales, debido dos causas:

En primer lugar, de *Termoquímica* a *Termodinámica Química* aumenta de manera significativa la dificultad de los cálculos planteados (en la segunda unidad didáctica se trabaja con la ecuación fundamental de la Termodinámica). En segundo lugar, tanto la utilización de los datos numéricos como su interpretación son mucho más complejas: para estudiar los aspectos de espontaneidad hay mucha más necesidad de coordinar las ideas de la ciencia escolar que subyacen a las cantidades numéricas, que para distinguir entre un proceso exotérmico y uno endotérmico atendiendo a la variación de entalpía del sistema.

Además, entre ***Cf*** y ***Rt*** se producen pérdidas en los valores de competencia de cuatro alumnos: Ana, Adela, Clara y Darío, pero esta vez por causas completamente diferentes. De hecho, los niveles de las competencias (capacidades) a las que se aludió en el párrafo anterior permanecen constantes, y en este caso los problemas están en la identificación de cuestiones científicas que requieren el tratamiento matemático, y en la aplicación del lenguaje matemático a la cuantificación de los aspectos relacionados con los fenómenos naturales. En ***Rt***, ninguno de los alumnos utilizó los datos numéricos de las tablas termodinámicas para obtener resultados cuantitativos en los que basar sus explicaciones y justificaciones (tampoco en la prueba *Rt03*, en cuyo enunciado se dan expresamente datos numéricos para el cálculo de la variación de energía de Gibbs del cambio de estado líquido-gas del agua); sí utilizaron las técnicas y métodos matemáticos para interpretar los signos de las variaciones de las magnitudes termodinámicas principales y para obtener conclusiones sobre la base de estas estimaciones.

Al mismo tiempo, dos de los alumnos, Benito y Darío, mejoraron entre ***Ci*** y ***Rt*** sus destrezas en la realización de representaciones gráficas, con la realización de gráficas de entropía frente a temperatura (o tiempo); pero en el caso de Benito se verifican pérdidas significativas en la calidad de las representaciones, debido a su decisión de dar prioridad al análisis de la entropía frente al tiempo en lugar de la temperatura, y por las ideas peregrinas que desarrolló sobre el control de las magnitudes (ver resultados del análisis *item* a *item* para *Rt01*). Este retroceso en el nivel de competencia no parece tanto efecto del olvido de los conocimientos adquiridos como no consolidación de los nuevos, porque se produce en un alumno que tenía inicialmente pocas destrezas y estrategias en Matemáticas y que, gracias a la implementación de la segunda unidad didáctica, había experimentado avances en la identificación de situaciones que exigen conocimientos matemáticos y en la utilización del lenguaje matemático para expresar los aspectos termodinámicos. Parece, pues, que la vuelta a una metodología tradicional no le ayudó a consolidar los procedimientos adquiridos.

Comparación de los niveles de competencia en comunicación lingüística, y competencia en el tratamiento de la información y competencia digital, que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia en comunicación lingüística	***Ci***	**3**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**2,63**	**1,06**
	Cf	**3**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,50**	**0,93**
	Rt	**4**	**4**	**2**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2**	**4**	**1**	**3,00**	**1,20**
Comprender e interpretar mensajes acerca de las Ciencias	***Ci***	**5**	**5**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,50**	**1,69**
	Cf	**3**	**4**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,75**	**1,49**
	Rt	**5**	**5**	**1**	**2**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3,13**	**2,03**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos con contenido científico	***Ci***	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,13**	**1,55**
	Cf	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**5**	**4**	**1**	**3,13**	**1,46**
	Rt	**5**	**5**	**2**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,75**	**1,58**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la comunicación de ideas (saber decir)	***Ci***	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**3**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,13**	**1,55**
	Cf	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**3,00**	**1,31**
	Rt	**5**	**5**	**2**	**4**	**1**	**1**	**5**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3,75**	**1,58**
Utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción del conocimiento (saber hacer)	***Ci***	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
	Cf	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Saberes actitudinales: utilizar el lenguaje de forma razonada y dialogante en la regulación de conductas y emociones	***Ci***	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
	Cf	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**4,88**	**0,35**
	Rt	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Competencia en el tratamiento de la información y Competencia digital	***Ci***	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Aplicar las formas específicas del trabajo científico para buscar, recoger, seleccionar la información, procesarla y presentarla	***Ci***	**3**	**3**	**1**	**1**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Cf	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,13**	**0,99**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1,50**	**0,53**
Utilizar las TIC para comunicarse, recabar información, visualizar situaciones, obtener y tratar datos	***Ci***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los resultados de las dos competencias que se analizan en la tabla anterior son más fáciles de interpretar:

Las pérdidas en la competencia en el tratamiento de la información y competencia digital se producen en todos los alumnos salvo Benito; éste y Clara son los únicos que después de la intervención pasaron a utilizar bastante más información que durante el periodo de cambio metodológico. Alfonso experimentó la evolución contraria: en la implementación de la segunda unidad didáctica se acentuó su tendencia a esperar que sus compañeras de grupo, Ana y Adela,

estudiaran los supuestos solas, para después aprovechar él la extracción y tratamiento de datos que ellas hubieran hecho; esta falta de desarrollo de las formas del trabajo científico es la responsable de que sus resultados de ***Cf*** sean tan bajos. Posteriormente, durante la vuelta a la metodología tradicional, como ésta promueve el trabajo exclusivamente individual, es posible que Alfonso se viera más obligado a trabajar por sí mismo (al menos, ya al final de la fase de intervención, se observaba que Ana y Adela no parecían tan proclives a trabajar con él, y es posible que esta nueva actitud hacia Alfonso se mantuviera en el tiempo a medida que se acercaba la cuenta atrás para la Selectividad).

Los estudiantes de la muestra avanzaron en sus competencias lingüísticas, a pesar de que su utilización del lenguaje siguió siendo bastante deficiente en cuanto al vocabulario, la expresión de las ideas, la ortografía y la puntuación; pero generaban textos con mayor sistematización de ideas e incorporaron el vocabulario científico hasta un punto en el que se puede considerar aceptable, teniendo en cuenta el nivel de conocimientos inicial y la fuerza con la que se encuentran arraigadas en la expresión cotidiana las acepciones no científicas de las palabras "calor", "trabajo" y "energía". Benito es el único alumno cuya competencia (capacidad) en la comprensión e interpretación de mensajes en Ciencias experimenta pérdidas en dos meses, debido a su renuncia a responder de manera detallada las cuestiones de ***Rt***. Era consciente, según Rodrigo, de que iba a aprobar la materia de Química, y consideraba que con "responder por la mínima" ya era suficiente para él.

En cuanto a utilizar adecuadamente el lenguaje en la construcción de textos de contenido científico y el *saber decir* lingüístico, parece que tanto el aprendizaje realizado durante la intervención, como la posterior instrucción tradicional, ayudaron a consolidar la utilización del vocabulario científico.

Comparación de los niveles de competencia social y ciudadana, y competencia en aprender a aprender, que demostraron los alumnos en las distintas pruebas de caracterización: inicial, final y retención

		Ana	Alfonso	Brais	Benito	Carlos	Berta	Adela	Diana	Clara	Darío	Débora	Promedio	Desviación típica
Competencia social y ciudadana	***Ci***	**4**	**2**	**2**	**4**	**1**	**1**	**4**	**2**	**4**	**4**	**1**	**3,25**	**1,04**
	Cf	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2,13**	**0,83**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
Comprender y explicar de manera científica problemas de interés social	***Ci***	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**3,50**	**2,07**
	Cf	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,13**	**1,55**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Aplicar el conocimiento	***Ci***	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**2,88**	**1,55**

sobre debates esenciales para el avance de la Ciencia, para comprender cómo han evolucionado las sociedades y para analizar la sociedad actual	*Cf*	**4**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**4**	**1**	**1**	**4**	**1**	**2,13**	**1,55**
	Rt	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1,00**	**0,00**
Comportarse individualmente según las normas y valores democráticos, al relacionarse con los demás y afrontar los conflictos	*Ci*	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**4,00**	**0,00**
	Cf	**4**	**4**	**3**	**4**	**2**	**1**	**4**	**1**	**4**	**4**	**1**	**3,63**	**0,74**
	Rt	**4**	**4**	**3**	**4**	**1**	**1**	**4**	**3**	**4**	**4**	**1**	**3,75**	**0,46**
Cooperar y comprometerse en el trabajo científico y en las relaciones interpersonales	*Ci*	**3**	**3**	**2**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,75**	**0,46**
	Cf	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**1**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2,63**	**0,52**
	Rt	**3**	**2**	**2**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2,63**	**0,52**
Competencia en aprender a aprender	*Ci*	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**4**	**1**	**4,00**	**0,00**
	Cf	**4**	**3**	**3**	**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**3**	**4**	**1**	**3,38**	**0,52**
	Rt	**4**	**3**	**3**	**4**	**1**	**1**	**3**	**3**	**3**	**4**	**1**	**3,38**	**0,52**
Iniciarse en el aprendizaje y ser capaz de continuarlo de manera autónoma (saber ser)	*Ci*	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
	Cf	**5**	**4**	**4**	**5**	**4**	**1**	**4**	**1**	**4**	**5**	**1**	**4,38**	**0,52**
	Rt	**5**	**4**	**4**	**5**	**1**	**1**	**4**	**4**	**4**	**5**	**1**	**4,38**	**0,52**
Desenvolverse ante las incertidumbres, tratar de buscar respuestas, admitir diversas soluciones ante un problema	*Ci*	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
	Cf	**5**	**5**	**5**	**5**	**4**	**1**	**5**	**1**	**5**	**5**	**1**	**4,88**	**0,35**
	Rt	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**1**	**5**	**5**	**5**	**5**	**1**	**5,00**	**0,00**
Habilidad para organizar el tiempo de forma efectiva y perseverancia en el aprendizaje	*Ci*	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**2,00**	**0,00**
	Cf	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**
	Rt	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1,75**	**0,46**

Como a lo largo de la Memoria de Tesis ya se ha hablado bastante de los aspectos actitudinales, el comentario sobre las competencias social y ciudadana, y aprender a aprender, es breve:

Todos los alumnos bajaron significativamente en sus niveles de competencia social y ciudadana a medida que pasaba el tiempo, se acababa el curso y se acercaban las PAAU. Estos alumnos afrontaron la adaptación a la nueva metodología con relativa buena disposición (si se tiene en cuenta que sus condicionantes actitudinales no eran demasiado favorables a un aprendizaje útil, significativo y avanzado de la ciencia escolar), pero a medida que pasaba el tiempo fueron manifestando una cierta dejadez generalizada en la realización de las actividades, porque veían que tenían que sostener el alto rendimiento cognitivo en todas las sesiones, y porque el curso avanzaba, y el final de su etapa en el Instituto estaba ya cerca. Parece que en la caída de los factores motivacionales hay dos aspectos que destacan claramente sobre los demás:

En primer lugar, estos alumnos se cansaban de trabajar las destrezas cognitivas de razonamiento y argumentación, que no consideraban importantes en el estudio de las Ciencias salvo a nivel profesional. Una de las expresiones más

repetidas en las entrevistas realizadas a estos estudiantes era "si no me voy a dedicar a esto…", expresión que la autora de esta Memoria lleva tres años escuchando con asiduidad a sus propios alumnos. El énfasis que puso Rodrigo durante la intervención en resaltar la utilidad de las Ciencias en el desarrollo de las sociedades humanas y en la dimensión lúdica del ser humano ("la curiosidad") no parecía en absoluto motivar a estos estudiantes, que podían demostrar interés en un momento por un determinado tema, pero a manera de anécdota; pasado el momento, nuevamente se cansaban de tener que asimilar nuevos conocimientos con tanto esfuerzo como se les exigía.

El segundo problema de tipo emocional que se presentó consiste en un progresivo distanciamiento, por parte de los alumnos, con respecto a sus compañeros y a todo lo relacionado con el Centro (tareas de clase incluidas), a juicio de los profesores, parece que éste es un comportamiento social que se repite año tras año en los alumnos de 2º de Bachillerato, que en pocos meses "toman [nuevas] posiciones [afectivas]" (en palabras del profesor de Dibujo Técnico) y se preparan anímicamente para abandonar el Centro educativo y dejar de ver con asiduidad a los que fueron sus compañeros de Instituto. La competitividad con la que se afronta el último tramo del curso, el estrés de la cuenta atrás final y la pugna por tener mejores calificaciones que los demás para acceder con mayor seguridad a la carrera universitaria deseada o el ciclo de Fp elegido, también afectan las relaciones emocionales que se establecen dentro de los grupos de clase, y tienden a distanciar a los alumnos.

Nuevamente, los resultados del análisis por competencias concuerdan con los del análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción, y los de la fase de intervención y la caracterización final arrojan información concordante: a lo largo de la unidad didáctica sobre Termodinámica Química, los alumnos construyeron un conocimiento que se puede considerar aceptable, en tanto en cuanto demuestra avances con respecto a la situación inicial, aunque se han producido algunas pérdidas en los dos meses posteriores a la intervención en el aula. En todo caso, se puede considerar el aprendizaje realizado es insuficiente para un curso preuniversitario, en cuanto a la movilización del conocimiento de la ciencia escolar para describir e interpretar los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos. La expresión de las ideas es todavía descuidada en general, a pesar de que los alumnos han interiorizado el lenguaje científico en lo esencial, y las actitudes de al menos tres alumnos son totalmente inadecuadas para el desarrollo de un aprendizaje significativo, reflexivo y que genere satisfacción personal y curiosidad por el conocimiento de la Ciencia y sobre la Ciencia.

Se confirma que el trabajo en un entorno colaborativo favorece la construcción de nuevas ideas. Esto sucede para los alumnos del grupo G_A y en la colaboración entre Clara y Darío; y el caso más claro es el de Benito, cuyos

resultados mejoran desde el momento en que entra a trabajar con los otros dos grupos y se aleja de su grupo de origen, G_B, en el que Berta aparece y desaparece intermitentemente, y Brais se resiste a cooperar.

VIII.3. Conclusiones de la investigación

A continuación, con el propósito de ofrecer una visión global del proceso, se establecen las conclusiones del trabajo de investigación, que se derivan del conjunto de las conclusiones relativas a las hipótesis de la investigación (expuestas en los ***Capítulos III-VII***). Las conclusiones de la investigación también tratan sobre el proceso de aprendizaje observado, sobre las propuestas didáctica ensayadas y sobre los instrumentos de análisis utilizados en la investigación.

VIII.3.1. Contraste de las hipótesis de trabajo

Los resultados de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias movilizadas por los alumnos ayudan a verificar las hipótesis y subhipótesis de partida tal como se enunciaron en el ***Volumen A***:

VIII.3.1.1. Subhipótesis $sHT_{1.1}$:

Al comienzo de la aplicación de la primera propuesta didáctica objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes son, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos. La aplicación de la primera propuesta didáctica favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento y de acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar los procesos termodinámicos de manera científica. Tras la aplicación de la primera propuesta en el aula, los estudiantes demuestran haber avanzado en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

VIII.3.1.2. Subhipótesis $sHT_{1.2}$:

Inmediatamente antes de la aplicación de la segunda propuesta objeto de investigación, los conocimientos de los estudiantes siguen siendo, desde el punto de vista de la ciencia escolar, poco adecuados e insuficientemente estructurados, por lo que constituyen esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— poco útiles para interpretar los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Sin embargo, los alumnos activan esquemas de razonamiento y acción, acordes con la ciencia escolar, sobre los que se construyen y estructuran los conocimientos que permiten interpretar científicamente los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Se verifican progresos significativos en los esquemas y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación inicial.

Mediante las actividades de la unidad didáctica *Termoquímica*, los alumnos de la muestra comenzaron a incorporar a su discurso ideas de la ciencia escolar sobre los siguientes aspectos termodinámicos:

- Sobre la identificación y descripción de los sistemas termodinámicos (***ER1***):
  - Llegaron a identificar sin problemas los sistemas reaccionantes; solamente en el caso de que un proceso físico o químico implique la realización de un gas a la atmósfera, tenían la tendencia a excluir el gas del sistema, y declarar a éste abierto. Además de la clasificación de los sistemas por sus interacciones con el entorno, establecieron adecuadamente los significados básicos de las magnitudes termodinámicas más sencillas: temperatura, presión y volumen. El concepto de temperatura se diferenció lo suficiente del de calor como para que se pueda considerar adecuado, aunque no se realizó la definición de la temperatura absoluta en relación con la energía de las partículas del sistema.
  - Construyeron los conceptos de energía interna y entalpía como variables termodinámicas que dan cuenta del estado energético del sistema.
  - Se presentaron dificultades en la conceptualización de la conservación de la materia en las reacciones químicas, y en el carácter extensivo de las magnitudes masa y número de mol.
- Sobre la identificación y descripción de los procesos termodinámicos (***ER2***):
  - Establecieron el concepto de estado del sistema y definieron los procesos

termodinámicos como evoluciones de un sistema entre dos estados inicial y final que implican transferencias de energía y/o materia; clasificaron los procesos según las condiciones de temperatura y presión en las que suceden.

- En cuanto a las transferencias de energía, llegaron a distinguir el calor y el trabajo y los relacionaron, respectivamente, con la variación de temperatura del sistema y con la variación de volumen del sistema; pero la concepción alternativa de calor y trabajo como *formas* de energía coexistió durante bastante tiempo con la idea de la ciencia escolar.

- Sobre la interpretación de los procesos termodinámicos (***ER3***) y la naturaleza de la Termoquímica (***ER4***):

  - Construyeron significados para las variaciones de las variables termodinámicas, tanto las básicas, como la energía interna y la entalpía, y relacionaron la variación de entalpía de los sistemas con los intercambios energéticos del sistema y con la ruptura y formación de interacciones.

  - Reconocieron la conservación y la degradación de la energía, aunque no la relacionaron explícitamente con la variación de energía del sistema. Establecieron la relación entre el calor (a presión o a volumen constante) y las variaciones de la energía interna y la entalpía.

  - Utilizaron los intercambios de energía entre el sistema y su entorno para clasificar los procesos como exotérmicos o endotérmicos, en función de la variación de entalpía; sin embargo, a medida que realizaban más actividades, parecían ir obviando que esta relación solamente es válida en condiciones de presión constante.

  - Realizaron experiencias calorimétricas mediante las que obtuvieron resultados que someter a análisis para extraer conclusiones; no obstante, la falta de hábito en la realización de acciones propias de la práctica científica, y los problemas actitudinales de algunos alumnos, impidieron una profundización adecuada a 2º de Bachillerato en la interpretación de las reacciones de neutralización.

  - Aplicaron las leyes de la Termoquímica para estudiar los procesos químicos desde el punto de vista energético, seleccionando datos termodinámicos tabulados y manipulándolos algorítmicamente para interpretar las transferencias energéticas de procesos no conocidos. La transformación de los datos termodinámicos utilizando las cuatro operaciones matemáticas básicas de suma, resta, producto y cociente les costó bastante (***EA3***).

  - En cuanto a la representación de los aspectos energéticos de las reacciones químicas (***EA2*** y ***EA3***), incorporaron buena parte del vocabulario científico a su discurso y sistematizaron la redacción de sus ideas, y dominaron sin

grandes problemas la notación estándar de las ecuaciones termoquímicas y la idea de que las transferencias energéticas dependen de la cantidad de materia del sistema; se presentaron numerosas dificultades en la elaboración de los diagramas entálpicos, sobre los que no se puede afirmar que haya habido un aprendizaje efectivo.

- Sobre la utilización de los modelos microscópicos de la Química (***ER5***):

  - Llegaron a reconocer la estructura corpuscular de la materia y a iniciar justificaciones sencillas sobre los cambios en la energía del sistema mediante razonamientos basados en los modelos microscópicos de la Química, pero estas ideas empezaron a construirse hacia el final de la unidad didáctica y necesitaban más tiempo para consolidarse en los esquemas de razonamiento.

  - Apenas se construyó un modelo de reacción aceptable, por falta de tiempo y por la escasez de conocimientos de partida de los alumnos. La distinción entre proceso físico y químico no estaba establecida, y faltaba un modelo cinético molecular sobre el que poder elaborar una mecanística básica de las reacciones químicas.

- Llegaron a resolver con éxito (pero con ayuda del profesor) cuestiones problemáticas sencillas sobre los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos (***EA4***). Las principales dificultades surgidas en la realización de las acciones de la investigación científica estuvieron relacionadas con la identificación de los aspectos relevantes de las tareas (sistema, proceso, magnitudes con las que analizar los aspectos energéticos…) y con la traducción de las ideas científicas al lenguaje matemático; no tanto con la operación inversa, la dotación de un significado a valores numéricos, aunque se presentaron dificultades relacionadas con el significado de los números negativos, con el valor absoluto y las unidades de medida de las magnitudes físicas.

VIII.3.1.3. Hipótesis HT_2:

La aplicación en el aula de la metodología ensayada, favorece o promueve la activación de esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con la ciencia escolar, que permiten a los estudiantes construir, estructurar y transferir sus conocimientos

para describir, explicar y predecir los procesos termodinámicos. A lo largo de la aplicación de la segunda propuesta en el aula, los estudiantes avanzan significativamente en sus competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Mediante las actividades de la unidad didáctica *Termodinámica Química*, los alumnos de la muestra comenzaron a incorporar a su discurso ideas de la ciencia escolar sobre los siguientes aspectos termodinámicos:

- Sobre la identificación y descripción de los sistemas termodinámicos (***ER1***):
  - La identificación de los sistemas reaccionantes se afianzó. Construyeron el concepto de entropía como una propiedad de los sistemas que depende de la naturaleza química (composición) y del estado de agregación, así como la temperatura. La definición de la entropía que más se repite es la de magnitud que mide el desorden de los sistemas, entendiendo el desorden como la labilidad de disposición de las partículas, dependiendo de la distancia (media) entre ellas y del estado de agitación atómico-molecular, directamente relacionado con la energía del sistema.
  - Construyeron los conceptos de energía interna y entalpía como variables termodinámicas que dan cuenta del estado energético del sistema.
  - Desaparecieron las dificultades en la conceptualización de la conservación de la materia en las reacciones químicas, y en el carácter extensivo de las magnitudes masa y número de mol.
- Sobre la identificación y descripción de los procesos termodinámicos (***ER2***):
  - Aunque ya no clasificaron los procesos según las condiciones de temperatura y presión en las que suceden, aludieron en más ocasiones a éstas como las causantes de cambios en el estado de los sistemas, de lo que se infiere que estarían construyendo un significado embrionario de los aspectos mecanísticos de los procesos químicos, que se podría aprovechar para introducir los aspectos de equilibrio.
  - En cuanto a las transferencias de energía, remitieron en parte las ideas alternativas sobre la naturaleza del calor y el trabajo.
- Sobre la interpretación de los procesos termodinámicos (***ER3***) y la naturaleza de la Termodinámica Química (***ER4***):
  - Construyeron significados para las variaciones de las nuevas variables termodinámicas: la entropía y la energía de Gibbs. De *G* no elaboraron un significado, sino que se centraron en el estudio de ΔG como un estimador de la espontaneidad de los procesos, teniendo en cuenta la cantidad de energía

transferida por calor (ΔH) y de la energía dispersada en el desorden (ΔS).

- Reconocieron los cambios que suceden en la entropía de los sistemas como consecuencia de los cambios de temperatura y de estado de agregación, aunque les fue difícil llegar a elaborar interpretaciones complejas en las que entrara el control de más de una variable de cada vez. Prefirieron claramente los modelos microscópicos para definir la variación de entropía, y apenas aludieron a la relación entre el cambio entrópico y la degradación de la energía.

- No se trabajaron apenas los conceptos de rendimiento de los procesos (éste solamente se relacionó con la degradación de la energía) y de irreversibilidad, por la falta de tiempo y las dificultades que tenían los alumnos para conceptualizar la dinámica de las reacciones químicas. Sí se construyó el concepto de espontaneidad de reacción, que los alumnos relacionaron con la tendencia de los procesos a suceder en un sentido determinado, dependiendo de las condiciones.

- Aplicaron el segundo principio de la Termodinámica para estudiar la degradación de la energía, aunque someramente, y llegaron a establecer la imposibilidad del móvil de segunda especie. Utilizaron la ecuación fundamental de la Termodinámica para predecir el sentido de los procesos químicos en unas condiciones dadas, y para predecir en qué condiciones se haría favorable un proceso dado. Nuevamente, la transformación de los datos termodinámicos utilizando las cuatro operaciones matemáticas básicas de suma, resta, producto y cociente presentó dificultades (***EA3***).

- En cuanto a la representación de los aspectos energéticos de las reacciones químicas (***EA2*** y ***EA3***), incorporaron buena parte del nuevo vocabulario científico a su discurso, aunque no se observó una mejoría adicional en la sistematización de las ideas. No se abordó la elaboración de diagramas o gráficas sobre los aspectos termodinámicos, a la espera de un momento posterior de aprendizaje para verificar los progresos realizados.

- Sobre la utilización de los modelos microscópicos de la Química (***ER5***):

  - Recurrieron múltiples veces a nociones relacionadas con la estructura corpuscular de la materia, para justificar y predecir los cambios en la entropía del sistema. Sin embargo, los escasos conocimientos de los alumnos a este respecto impidieron la construcción de las ideas mecanocuánticas y estadísticas de la Termodinámica contemporánea.

  - Apenas hubo nuevas oportunidades para construir un modelo de reacción aceptable, porque los alumnos tendieron a rechazar todo conocimiento nuevo relacionado con los modelos microscópicos. Se sentían cómodos y seguros con los sencillos modelos de partículas que habían

desarrollado, y el marco teórico simple formado por el estudio de las condiciones de reacción, la aplicación de las ideas de endotermia/exotermia y cambios en el desorden les parecía lo más fácil y rápido para resolver las cuestiones propuestas.

- Llegaron a resolver con éxito (pero con ayuda del profesor) cuestiones problemáticas sencillas sobre los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos (***EA4***). En este caso, las principales dificultades surgidas en la realización de las acciones de la investigación científica estuvieron relacionadas con la expresión de las ideas científicas en función de las características del lenguaje matemático; los criterios de signos introdujeron nuevas dificultades relacionadas con el significado de los números negativos y la confusión de criterios de signos (espontaneidad o no espontaneidad, exotermia o endotermia…); pero no se presentaron ideas alternativas que ligaran la espontaneidad con la exotermia o la velocidad de reacción.

VIII.3.1.4. Subhipótesis $sHT_{3.1}$:

Después de la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes activan esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Tras la aplicación de la segunda propuesta en el aula, se verifican progresos significativos en los esquemas de razonamiento y acción y en las competencias de los estudiantes, respecto de su situación anterior a la aplicación de la segunda propuesta didáctica.

VIII.3.1.5. Subhipótesis $sHT_{3.2}$:

Después de un cierto tiempo desde la aplicación de la segunda propuesta didáctica objeto de investigación, los estudiantes continúan activando esquemas de razonamiento —***Sistemas termodinámicos*** (***ER1***), ***Procesos termodinámicos*** (***ER2***), ***Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos*** (***ER3***), ***Dinámica de los procesos químicos*** (***ER4***) y ***Aspectos microscópicos de los procesos físicos y***

químicos (***ER5***)— y esquemas de acción —***Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos*** (***EA1***), ***Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos*** (***EA2***), ***Representación gráfica de aspectos termodinámicos*** (***EA3***) y ***Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química*** (***EA4***)— acordes con el punto de vista de la ciencia escolar, y útiles para la interpretación de los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales. Los alumnos continúan demostrando competencias al transferir sus conocimientos para describir, explicar y predecir situaciones, hechos y fenómenos relacionados con los procesos termodinámicos que experimentan los sistemas materiales.

Existe una permanencia significativa en los aprendizajes realizados, al cabo de un cierto tiempo desde la intervención.

Al cabo de dos meses de la implementación de la metodología ensayada, se observan progresos significativos en los conocimientos de los alumnos, aunque también algunas pérdidas significativas en los aprendizajes realizados:

- Sobre la identificación y descripción de los sistemas termodinámicos (***ER1***):
  - La identificación de los sistemas reaccionantes se conserva en el discurso de los estudiantes, así como la descripción de los sistemas utilizando variables termodinámicas, desde las ya conocidas (composición química, estado de agregación, temperatura…) como las introducidas en las unidades didácticas (entalpía, entropía y energía de Gibbs).
  - Desde el punto de vista microscópico, apelan más a la naturaleza corpuscular de la materia, en especial si se trata de estudiar los aspectos entrópicos. La definición de entropía fluctúa entre la cercana a la ciencia escolar que hemos descrito en el apartado anterior, y la de "desorden de los sistemas"; se hace menos hincapié en la relación entre el desorden y la energía del sistema, aunque aquél se vincula todavía a la temperatura.
- Sobre la identificación y descripción de los procesos termodinámicos (***ER2***):
  - Siguen aludiendo a temperatura y presión como condiciones que tienen que ver con los cambios en el estado de los sistemas, aunque ya no clasifican los procesos en función de éstas; en general, las relaciones descriptivas tienden a verse relegadas en función de las interpretativas.
  - En cuanto a las transferencias de energía, las ideas de la ciencia escolar sobre la naturaleza del calor y el trabajo se han afianzado en la mitad de los alumnos, pero la otra mitad continúa sosteniendo ideas alternativas, en concreto relacionadas con la estructura de las *formas de energía*.
- Sobre la interpretación de los procesos termodinámicos (***ER3***) y la naturaleza de la Termodinámica Química (***ER4***):

- Retienen los significados de las variaciones de las nuevas variables termodinámicas: la entalpía, la entropía y la energía de Gibbs, aunque de ΔG solamente hacen referencia a que es un estimador de la espontaneidad, teniendo en cuenta la cantidad de energía transferida por calor (ΔH) y la dispersada en el desorden (ΔS). Reconocen que la variación de entalpía tiene que ver con las transferencias energéticas por calor, pero confunden los criterios de signos, y en ocasiones se posicionan como observadores que miden la variación de temperatura del sistema como criterio para decidir la exotermia o endotermia del proceso. En algunos casos, relacionan la variación de entropía con el orden y no con el desorden termodinámico.

- Reconocen los cambios que suceden en la entropía de los sistemas como consecuencia de los cambios de temperatura y de estado de agregación, aunque sigue siendo difícil llegar a elaborar interpretaciones complejas en las que entre el control de más de una variable de cada vez; si tienen que controlar entropía, tiempo y temperatura en un experimento en el que la temperatura descienda, solamente son capaces de imaginarse el proceso contrario, con la temperatura en tendencia ascendente. De todos modos, siguen prefiriendo los modelos microscópicos para definir la variación de entropía, no así para la variación de entalpía.

- Como era de esperar, el concepto de irreversibilidad está alejado de la ciencia escolar. En cuanto a la noción de espontaneidad, no la relacionan con el balance energético del proceso ni con la velocidad del mismo, aunque aparecen algunas ideas alternativas: un proceso es espontáneo si sucede a temperatura ambiente, o si el sistema dispersa energía y se desordena, o si la estructura no se recupera.

- Todavía aplican primer principio de la Termodinámica en relación con las transferencias energéticas; el segundo principio no tiene tanta aceptación, y el tercero apenas se conceptualiza como principio de la Termodinámica; aunque la definición explícita de la temperatura absoluta es minoritaria, sigue la pugna por sostener las ideas de la ciencia escolar sobre el desorden termodinámico y su relación con la temperatura, en lo que parece un conflicto cognitivo que podría aprovecharse para afianzar las ideas de la ciencia escolar. No hay, pues, grandes retrocesos en este sentido.

- Todavía pueden utilizar la ecuación fundamental de la Termodinámica, pero se resisten a ello, y no llegan a transformar datos termodinámicos utilizando las cuatro operaciones matemáticas básicas de suma, resta, producto y cociente si pueden resolver la cuestión de manera cualitativa (***EA3***).

- En cuanto a la representación de los aspectos energéticos de las reacciones químicas (***EA2*** y ***EA3***), buena parte del vocabulario científico sigue en el

discurso de los alumnos, y se mantiene o mejora la expresión y la sistematización de las ideas. La elaboración de gráficas sobre los aspectos termodinámicos sigue presentando dificultades, aunque se observan progresos a este respecto.

- Sobre la utilización de los modelos microscópicos de la Química (***ER5***):
  - Las únicas nociones que citan tienen que ver con la estructura corpuscular de la materia, para justificar y predecir los cambios en la entropía del sistema. No hacen uso de modelos de enlace y reacción química para justificar sus descripciones e interpretaciones sobre los demás aspectos termodinámicos, aunque de las respuestas elaboradas se infiere que probablemente se retengan buena parte de las ideas de la ciencia escolar.
- Llegaron a resolver con relativo éxito, si ayuda del profesor, cuestiones problemáticas muy sencillas sobre los aspectos termodinámicos de los procesos físicos y químicos (***EA4***). Las principales dificultades para ello están en la transferencia de las ideas a supuestos poco conocidos y en el control de múltiples variables. Se percibe que los alumnos se sienten inseguros de sus conocimientos después de dos meses y procuran "despachar" las cuestiones cuanto antes sin dar a entender que se han olvidado de determinados aspectos, y estas reservas no ayudan a reflexionar sobre las propias ideas y a estructurarlas adecuadamente para ofrecer respuestas más elaboradas.

En resumen, el análisis completo de los esquemas de pensamiento de los alumnos antes y tras la intervención apunta a que, en conjunto, la propuesta didáctica ha sido eficaz propiciando cambios significativos en los esquemas de pensamiento de los alumnos, tanto en lo referente al razonamiento, como en lo referente a la acción. Así pues, se confirman todas las hipótesis de la investigación tal y como se enunciaron, puesto que los resultados de los esquemas de razonamiento y acción y de las competencias apuntan en el mismo sentido: la consecución de los objetivos básicos de las propuestas ensayadas y la verificación de los criterios de evaluación.

Pero la verificación de las conclusiones debe entenderse en el marco de un estudio de caso (investigación de tipo *quasi*-experimental), con una muestra de dimensiones reducidas que excluye toda posibilidad de generalizar los resultados. El pequeño tamaño de la muestra nos ha venido, en parte, impuesto por las circunstancias, puesto que se pretendía llevar al aula una unidad didáctica para la enseñanza de la Termodinámica Química en 2º de Bachillerato, y las aulas de estos niveles no suelen contar con muchos alumnos de Ciencias; menos aún, en institutos como éste en el que ha tenido lugar la intervención, institutos situados fuera de las grandes ciudades y en zonas económicamente deprimidas, con la emigración como fenómeno social en auge y la sensación de desarraigo muy patente en los jóvenes. Quizá hubiera sido más interesante realizar este estudio con una muestra de mayor

tamaño, más homogeneidad socioeconómica y, sobre todo, mejores condicionantes actitudinales y motivacionales; pero nuestra pretensión ha sido diseñar, implementar y evaluar una unidad didáctica que se pueda llevar a la realidad de las aulas actuales, y la realidad de esta aula no es única ni en la comarca, ni fuera de ella. Además, en otros dos sentidos, la limitación del tamaño muestral ha sido útil:

En primer lugar, ha permitido estudiar en profundidad las características idiosincrásicas de los alumnos, sus conocimientos de partida y sus condiciones afectivas y coyunturales. En segundo lugar, ha sido útil para probar en un entorno controlado el método de análisis del aprendizaje por competencias, que se ha demostrado eficaz para indagar en las características del conocimiento construido por los alumnos como consecuencia de su interacción con la metodología ensayada.

Cuando se pretende evaluar una variable dependiente tan compleja como el aprendizaje alcanzado por los alumnos de un grupo como resultado de su interacción con una metodología novedosa, la elección de los instrumentos de evaluación debe ser tal que permita asignar valores a la variable dependiente y aislar o controlar en lo posible las variables intervinientes. Para controlarlas, hemos aprovechado que los alumnos de la muestra pertenecían al mismo grupo de clase y compartían profesor, así que la metodología, la intervención docente, los contenidos de enseñanza y aprendizaje, las tareas realizadas y las pruebas de evaluación fueron idénticas para todos. En cuanto a las variables idiosincrásicas de los alumnos, todos tenían entre 17 y 18 años de edad y cursaban la misma modalidad de Bachillerato. Ninguna de las materias optativas que habían elegido incluía contenidos sobre la Termodinámica de los procesos químicos, y nos aseguramos de que los los estudiantes no recibieran información institucional adicional sobre Termoquímica y Termodinámica Química. Las principales variables idiosincrásicas que podrían tener alguna incidencia en el aprendizaje son el sexo de los alumnos (que, a la vista de los resultados, podemos afirmar que no ha influido de manera decisiva en el aprendizaje), la condición de Adela como alumna repetidora de la Química de 2º (que tampoco ha influido, puesto que esta alumna no tenía conocimientos sustancialmente distintos de los de sus compañeros), y el nivel de asistencia a clase, que sí ha tenido una incidencia determinante en los resultados que se pretendían obtener. Aunque durante la parte experimental de la investigación no baja en el Centro ningún alumno, a la larga se observó una clara tendencia hacia el abandono escolar en varios integrantes de la muestra (Carlos, Berta, Diana y Débora). Sobre esta tendencia, tenemos que realizar varias matizaciones:

En primer lugar, la inasistencia de estos alumnos a las sesiones de clase repercutió en la variable dependiente de la investigación, haciendo disminuir drásticamente el número de oportunidades de aprendizaje para estos estudiantes, que claramente realizaron menos tareas ubicadas en sus niveles de ZDP, que les ayudarían a progresar en sus conocimientos conceptuales y procedimentales (y

quizá también actitudinales).

En segundo lugar, la inasistencia observada es una manifestación del rechazo al aprendizaje y al entorno concreto en el que éste tiene lugar, en lo que constituye un claro obstáculo actitudinal a la construcción de conocimientos. Hemos intentado en lo posible esclarecer las causas del absentismo escolar de estos alumnos y combatirlas, y de las indagaciones realizadas se concluye que el absentismo de estos cuatro alumnos no estuvo en absoluto relacionado con un hipotético rechazo a la metodología ensayada:

Estos cuatro alumnos faltaron sistemáticamente a más asignaturas que Química. Además, sus ausencias comenzaron inmediatamente después de recibir las calificaciones (negativas) del segundo trimestre, y en las entrevistas realizadas se confirmó que tres de ellos, Carlos, Diana y Débora, habían decidido dejar de estudiar Química (dejarla "por imposible", en palabras de Diana) hasta el verano, para prepararse en tres meses y aprobar la convocatoria de septiembre. El caso de Berta es distinto: las desafortunadas circunstancias económicas de su familia la obligaron a abandonar temporalmente las clases, y después de casi dos meses de ausencia forzosa, tenía claro que no podría aprobar la materia en junio.

La inasistencia prolongada de estos alumnos puede considerarse como muerte muestral, y esta circunstancia reduce la muestra objeto de estudio todavía más: de once alumnos iniciales, el grupo de clase se queda en siete u ocho (la octava alumna, Diana, era asistente ocasional), lo que inevitablemente hace plantearse dos ideas, una práctica y la otra afectiva: la primera es la eliminación de todo (o prácticamente todo) estudio estadístico, incluida la validación del método de análisis del aprendizaje por competencias. La segunda, que tiene que ver con las ideas personales e intenciones de la autora, es hasta qué punto se puede concluir que la metodología ha tenido éxito aunque ayude a los demás alumnos a aprender Termodinámica Química. La inasistencia de alrededor de un 30% de una muestra tiene un efecto muy negativo en los resultados de aprendizaje, no en cuanto a la investigación en sí (los casos de muerte muestral *no cuentan*), pero sí en cuanto a la alfabetización científica de la población y a las oportunidades que ésta ofrece para crear un futuro mejor para la sociedad en su conjunto y para los individuos que disfrutan del conocimiento científico.

En este caso, desde el punto de vista de la investigación, podemos considerar el absentismo una variable contextual que ha salido al paso y ha afectado a la naturaleza de la muestra y, probablemente, ha tenido influencia en el desempeño de los alumnos que sí asistieron. El entorno colaborativo que se había generado en alguno de los grupos de aula ayudó claramente a impulsar la generación de conocimiento (se ve claramente este efecto en el caso del grupo G_A), y es de prever que, a la larga, se convirtieran en un lastre los aspectos actitudinales negativos de los alumnos no asistentes y de los que, aun asistiendo, como Brais, mostraban cierta

hostilidad hacia sus compañeros o "pasotismo" ante el aprendizaje (como es el caso en el que parecía ir derivando Alfonso). La medición exhaustiva de la interacción de los obstáculos actitudinales en el aprendizaje está fuera del alcance de este trabajo, y los resultados que se han obtenido están sometidos a las limitaciones de un estudio de caso con una muestra de tamaño reducido.

VIII.3.2. Otras conclusiones sobre el proceso de aprendizaje, sobre las propuestas de enseñanza ensayadas y sobre los métodos de análisis del aprendizaje

Desde el punto de vista conceptual, la Termodinámica Química es uno de los temas más complejos, dado que su enseñanza requiere atender a la vez a muchos conceptos y sus relaciones, de forma tal que sean percibidos como una unidad e integrados de esta manera al conocimiento preexistente. Los modelos macroscópicos y microscópicos construidos constituyen un buen punto de partida para avanzar en la construcción de la Cinética Química y el Equilibrio Químico como las otras dos disciplinas relevantes de la Dinámica de los procesos químicos.

En conjunto, los alumnos han activado esquemas de razonamiento y acción útiles para la descripción termodinámica de los sistemas químicos y de los procesos que en ellos tienen lugar. A lo largo de la implementación de la secuencia *Termodinámica Química*, las ideas de los alumnos se modificaron significativamente hacia la construcción de relaciones más acordes con las ideas de la ciencia escolar. El proceso de aprendizaje que realizaron los alumnos se considera significativo, puesto que se produjo un avance en los esquemas de razonamiento y acción del conjunto del alumnado, y en cuanto a las competencias demostradas, los niveles de la competencia se mantienen con respecto al referencial de la ciencia escolar, que mostró una tendencia *in crescendo*. Este hecho nos permite inferir la capacidad de la propuesta didáctica para propiciar cambios en los esquemas de pensamiento de los alumnos de la muestra.

Después de las dos propuestas de enseñanza ensayadas, el conjunto de los estudiantes era capaz de delimitar los sistemas objeto de estudio, distinguir las transferencias energéticas por calor y trabajo, analizar cualitativamente las situaciones problemáticas exotérmicas o endotérmicas, espontáneas o no espontáneas, modelizar macroscópicamente los intercambios energéticos que ocurren en las interacciones entre sistemas, y asociar energía a los cambios microscópicos de los procesos físicos y químicos (modelización atomista), aunque en un nivel tan básico que no se puede considerar deseable para 2º de Bachillerato. Construyeron un significado macroscópico para la espontaneidad de los procesos, y analizaron la misma utilizando la variación de energía de Gibbs como estimador. Las dificultades relacionadas con el manejo de las magnitudes físicas, los criterios de signos, los números reales y la elaboración e interpretación de gráficas fueron

remitiendo a lo largo de la intervención, aunque no se pueden considerar satisfactorias, dado el número de relaciones alternativas detectadas y su extensión.

Pero, en general, los estudiantes superaron en una extensión aceptable las dificultades y concepciones alternativas que se detectaron en la investigación y que suponen obstáculos para una correcta comprensión de los aspectos energéticos de los procesos físicos y químicos. El acercamiento a las ideas de la ciencia escolar se produjo sobre todo en la diferenciación de energía, calor y temperatura, en el sentido de las transferencias energéticas de calor y trabajo, y en la realización de cálculos sobre las transferencias energéticas. Manejaron adecuadamente los conceptos de energía interna y entalpía, construyeron una noción de entropía cercana a la de la ciencia escolar, aunque todavía influida por las ideas alternativas sobre el desorden entendido como "caos en el espacio". En todo caso, los avances en el aprendizaje pueden continuar a partir de los modelos de partículas, enlace y reacción química construidos, que, aun siendo embrionarios, demuestran mayor imbricación de ideas que al comienzo de la intervención.

Los principales problemas y obstáculos al aprendizaje son de tipo axiológico, y tienen que ver con la actitud indiferente o mercantilista hacia el aprendizaje por parte de algunos alumnos. A lo largo de la intervención se produjo la muerte muestral de tres (o cuatro) de los alumnos del grupo estudiado, debido al reiterado absentismo de éstos a las clases. Nos consta que este absentismo no tiene relación con la metodología ensayada, porque se produce también en otras materias y con otros profesores que no aplican los mismos principios metodológicos que los ensayados en esta investigación.

No se pudo construir conocimiento sobre los aspectos estadísticos y cuánticos de la Termodinámica, dado el bajo nivel conceptual y procedimental de los alumnos. Sin embargo, los modelos microscópicos de enlace y reacción química permiten interpretar la diferencia de entalpía de un cambo físico o químico como el balance entre la entalpía aportada para romper los enlaces en las partículas de las sustancias reaccionantes y la liberada al formarse nuevos enlaces en las sustancias que se originan en el proceso.

Los alumnos avanzaron en sus conocimientos sobre los aspectos básicos del tratamiento científico del problema hasta llegar a una solución, lo que implica la emisión de hipótesis, la elaboración de estrategias y la interpretación física o química de datos numéricos. Quizá éste sea uno de los logros más interesantes de la investigación, porque la práctica de los procesos científicos contribuye a la enculturación en las Ciencias y ayuda a la generación y evaluación autónoma del conocimiento, más allá de las aulas, además de acercar a los estudiantes el lenguaje de las Ciencias. La mejoría que se observó en los aspectos procedimentales del conocimiento de los alumnos animó a Rodrigo, el profesor, a hacer suyas parte de las innovaciones de esta investigación. También fue de su agrado el contexto

colaborativo que se logró en el aula, a pesar de los problemas actitudinales de algunos alumnos; según Rodrigo, este ambiente influyó positivamente en la autoconfianza de los alumnos, en la relación personal entre los estudiantes y en el nivel de autonomía y el trabajo en equipo.

A pesar de las dificultades actitudinales que se encontraron, la investigadora valora como muy positiva la posibilidad y la experiencia de haber llevado al aula las dos unidades didácticas diseñadas. Además de la satisfacción personal de volver al centro educativo en el que estudió, tuvo la oportunidad de entrar en un aula y participar de la labor cotidiana, la ilusión y la perseverancia de Rodrigo, el profesor colaborador en esta investigación. Sus consejos y la observación diaria de su trabajo, junto con el trabajo realizado en la investigación, han constituido una vivencia interesante y motivadora. El único sinsabor de la parte experimental ha sido la imposibilidad de cambiar las actitudes negativas de algunos alumnos hacia el aprendizaje de las Ciencias, aunque no existiera un rechazo hacia la metodología ni los materiales ensayados. A este respecto, los docentes entrevistados sostienen que la mayoría de los alumnos del Centro consideran la *Química* como una materia "impuesta", que han de cursar "por capricho de los legisladores". Los factores contexuales, en este caso, desde luego han sido en general negativos en lo que tiene que ver con las diversas componentes de la actitud: interés, motivación, valores, estilo de aprendizaje, la relación entre reto, motivación y dificultad… Los alumnos de este grupo no tenían las características actitudinales más adecuadas para interesarse por los contenidos que se les pretendía enseñar y, a ser posible, disfrutar.

Por otra parte, las dos propuestas ensayadas se adecuaron al tiempo de aplicación que se preveía, lo que resulta especialmente difícil en 2º de Bachillerato, dada la cercanía de las pruebas de Selectividad. Así pues, consideramos que el impacto de las propuestas de enseñanza fue potencialmente muy positivo, en tanto en cuanto fue capaz de promover conocimiento en una muestra de estudiantes con motivaciones opuestas a los propósitos de la ciencia escolar, y de generar el aprendizaje en un tiempo razonable como para que los alumnos no perdieran la ocasión de recibir las clases intensivas de adiestramiento para las PAAU.

En cuanto a los métodos de análisis del aprendizaje generado, se determinaron los esquemas de pensamiento que activaron los estudiantes a medida que desarrollaron las actividades. Considerando que la estructura cognitiva se organiza en un conjunto de esquemas de pensamiento (razonamiento y acción), que constituyen redes de relaciones conceptuales referentes a un ámbito concreto, se pueden caracterizar las estructuras del discurso de los alumnos utilizando esquemas de razonamiento y acción (Domínguez *et al.*, 2003). Sobre la base de los esquemas referenciales elaborados en la planificación de las unidades didácticas ensayadas, y partiendo de los razonamientos argumentativos y las acciones que los estudiantes demostraron en sus respuestas, se establecieron sus esquemas idiosincrásicos de

razonamiento y de acción. El aprendizaje se evalúa analizando la evolución de los esquemas idiosincrásicos desde antes hasta después de la instrucción (del *pre-test* al *post-test* y al *test* de retención).

Los esquemas de razonamiento y acción se han revelado como herramientas válidas para evaluar tanto el aprendizaje de los alumnos como la propia propuesta didáctica. El análisis de los esquemas ha permitido a los investigadores cuantificar en qué medida la propuesta es capaz de generar cambios significativos en el conocimiento de los alumnos, y constatar hasta qué punto éstos han incluido en su discurso relaciones deseables desde el punto de vista de la ciencia escolar.

Se diseñó un nuevo método de evaluación del aprendizaje por competencias, que se ha analizado por comparación cualitativa con respecto al análisis del aprendizaje por esquemas de razonamiento y acción. El hecho de disponer de una muestra con un número reducido de individuos (como ha hecho Bravo Torija y Jiménez Aleixandre, 2012) ha permitido estudiar de manera cualitativa si ambos tipos de análisis arrojan resultados coincidentes, y se comprueba que así ha sido. A falta de un análisis más exhaustivo y que incluya métodos estadísticos de contraste, se puede concluir que el análisis del aprendizaje por competencias aporta información sobre el nivel de movilización del conocimiento de la ciencia escolar que realizan los alumnos, fijando previamente el nivel de conocimiento que se supone deseable desde la ciencia escolar (competencias referenciales).

Además, el nuevo método de análisis por competencias ha permitido analizar hasta qué punto fueron eficaces en la generación de conocimiento las distintas actividades de la secuencia de actividades *Termodinámica Química*.

VIII.4. Implicaciones de la investigación

Sobre la base de las conclusiones emitidas en el epígrafe anterior, se exponen algunas implicaciones para la enseñanza y diversas reflexiones sobre las dos propuestas ensayadas, incluyendo sugerencias para su revisión y adecuación a los contextos de aula, y recomendaciones para futuras implementaciones de las propuestas de enseñanza sobre Termoquímica y Termodinámica Química. Para ambas se han secuenciado unos objetivos que permiten verificar sus logros y reformular las secuencias de actividades para adecuarlas en función del aprendizaje realizado en el aula.

En conjunto, las dos secuencias de actividades se han revelado útiles para promover una construcción significativa de las relaciones de razonamiento y acción de la ciencia escolar y ayudar a los alumnos a alcanzar un nivel aceptable de competencias científicas, matemáticas, lingüísticas, sociales y ciudadanas, en la comunicación y competencia digital, y aprender a aprender.

Los resultados obtenidos permiten emitir algunas sugerencias encaminadas

a reforzar la intervención docente para ayudar a los alumnos superar las dificultades de aprendizaje e ideas alternativas que se han encontrado en el transcurso de esta investigación:

En cuanto a la temporalización de las unidades didácticas, cada una de ellas puede realizarse entre unas seis y doce sesiones, dependiendo de los conocimientos de partida del alumnado y de la profundidad con la que se traten los contenidos. La naturaleza de la mayoría de las tareas es abierta y está diseñada para que los alumnos transfieran los conocimientos construidos a nuevas situaciones y contextos en los que se necesite dar respuesta a cuestiones de base científica. Con la finalidad de potenciar la capacidad de las actividades de *Termoquímica* y *Termodinámica Química* para la generación de nuevo conocimiento, recomendamos ampliar el número de ejemplos que se proponen en las actividades, para que se puedan trabajar los mismos conceptos, modelos y procedimientos en diferentes contextos y situaciones. Por ejemplo:

- [*Termoquímica*]: Para desinflamar una zona del cuerpo lesionada, los médicos deportivos aplican geles que se venden con el nombre de "efecto frío". ¿En qué se basa su efectividad? Diseña un experimento por el que se puedan comprobar cuáles son los efectos de estos geles sobre una lesión.

- [*Termodinámica Química*]: Desde el siglo XIX se ha discutido la hipótesis de la "muerte térmica" del Universo, de la que ya hemos hablado. Si la Tierra es un planeta rodeado de espacio prácticamente vacío, con muy pocas partículas que puedan transferir energía a la atmósfera terrestre, ¿por qué no encontramos en nuestro planeta pruebas de una "muerte térmica" de la Tierra?

Las actividades que se han utilizado como pruebas de las baterías de caracterización (inicial final y de retención) también se pueden integrar en las secuencias *Termoquímica* y *Termodinámica Química* junto con las ya comentadas.

En cuanto a los recursos y técnicas utilizados en las actividades de las dos unidades didácticas, consideramos que son suficientemente funcionales como para que las propuestas de enseñanza sean llevadas al aula sin necesidad de utilizar recursos adicionales, aunque se podrían adjuntar tablas, gráficas y textos que amplíen y complementen la información que se suministra en cada actividad.

La complejidad de las tareas está adaptada al nivel de 2º de Bachillerato, y resulta difícil seleccionar ejemplos más sencillos y significativos para el alumnado que los cambios de estado del agua o las reacciones de combustión. Quizá la única actividad que presente un proceso poco conocido para los estudiantes sea la formulación original de *Fi01*, cuya implementación en el aula reveló que los alumnos tenían bastantes dificultades para predecir el sentido de las transferencias de energía entre el sistema y el entorno. En lugar del proceso propuesto en *Fi01*, se puede utilizar algún otro proceso endotérmico más familiar, como uno de los

cambios de estado progresivos del agua (que fue la opción que eligió Rodrigo sobre la marcha para continuar con la intervención) o de algún líquido orgánico conocido, como la evaporación de los alcoholes o de la acetona.

También se recomienda que la realización de las actividades que incluyen cálculos matemáticos sea lo más accesible y reflexiva posible, porque la literatura del área ha constatado que la resolución eficaz de problemas algorítmicos y la comprensión conceptual no tienen por qué estar vinculados (Nuremberg y Pickering, 1987; Nakhleh y Mitchell, 1993), y porque los alumnos tienden a recurrir a formas de aprendizaje que son repetitivas y memorísticas, mediante las cuales la nueva información no se integra en la estructura cognitiva previa del estudiante y, por tanto, las concepciones iniciales no se ven influidas (al menos, no de manera significativa) por la interacción con las ideas de la ciencia escolar. Los contenidos objeto de aprendizaje, desligados de las estructuras de conocimiento, no se transferirán con facilidad a otros contextos, y se olvidarán con rapidez.

VIII.5. Nuevos problemas de investigación que podrían ser la base de futuros trabajos

El ***Capítulo VIII*** finaliza con la formulación de nuevos problemas de investigación que pueden servir de planteamiento para futuros trabajos.

La eficacia de las unidades didácticas ensayadas en la generación de un proceso de aprendizaje significativo, útil y funcional de la ciencia escolar, se ha evaluado en una muestra pequeña y fácil de monitorizar. Podría probarse, además, en una muestra con mayor número de individuos, lo que permitiría realizar un estudio estadístico con el que re-evaluar ambas propuestas.

Realizándole algunas modificaciones para readaptarla a los niveles de 1º de Bachillerato (o incluso a 4º de ESO), *Termoquímica* y *Termodinámica Química* podrían llevarse a aulas con un mayor número de alumnos, en las que se obtuviera un número de resultados que facilitara el estudio estadístico de la efectividad de las secuencias de actividades en las formas de pensar y de hacer de una muestra representativa del alumnado de otros cursos.

En lo que respecta al método de análisis del aprendizaje por competencias, que se ha diseñado en esta investigación, queda para futuros trabajos simplificarlo para hacerlo accesible al profesorado. Una vez reducido el número de elementos de la competencia, este tipo de análisis puede extenderse sin dificultad al diseño y evaluación de propuestas completas, actividades de refuerzo, pruebas escritas y otros materiales de enseñanza, abarcando tantos temas como se desee, más allá de la Termodinámica y de la propia Química.

Para verificar si este nuevo método de análisis resulta útil al profesorado, podría facilitársele en versión simplificada a una muestra de docentes de Ciencias,

junto con un formulario de evaluación del método, alguna propuesta de cuestiones y un espacio para recoger los comentarios y sugerencias de los profesores.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Este ***Volumen B2***, práctico, se cierra con un apartado dedicado a la bibliografía que ha servido para la fundamentación del trabajo de Tesis. La lista completa de las referencias bibliográficas citadas en la Memoria se ordena alfabéticamente en el ***Índice de la bibliografía consultada***.

Índice de la bibliografía consultada

Abraham, M. R.; Gryzybowski, E. B.; Renner, J. W. y Marek, A. E. (1992). "Understanding and misunderstanding of eight graders of five chemistry concepts found in textbooks". *Journal of Research in Science Teaching,* 29, 105-120.

Abraham, M. R.; Williamson, V. M. y Westbrook, S. L. (1994). "A cross-age study of the understanding of five chemistry concepts". *Journal of Research in Science Teaching,* 31 (2), 147-165.

Acevedo, J. A. (2005a). "Proyecto ROSE: relevancia de la educación científica". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2 (3), 440-447. También disponible en http://www.apac-eureka.org/revista/Larevista.htm.

Acevedo, J. A. (2005b). "TIMSS y PISA. Dos proyectos internacionales de evaluación del aprendizaje escolar en ciencias". *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias,* 2 (3), 282-301. También disponible en http://www.apac-eureka.org/revista/Larevista.htm.

Adúriz, A. y Izquierdo, M. (2002). "Acerca de la didáctica de las ciencias como disciplina autónoma". *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias,* 1 (3), 130-140.

Albert, E. (1978). "Development of the concept of heat in children". *Science Education,* 62 (3), 389-399.

Alomá, E. y Malaver, M. (2007). "Análisis de los conceptos de *energía*, *calor*, *trabajo* y *el teorema de Carnot* en textos universitarios de Termodinámica". *Enseñanza de las Ciencias,* 25 (3), 387-400.

Alonso, M. y Finn, E. (1995). "An Integrated Approach to Thermodynamics in the Introductory Physics Course", *The Physics Teacher,* 33, 296-310.

Alonso, M. y Finn, E. (1996). "Un enfoque integrado de la Termodinámica en el curso de Física General". *Revista Española de Física,* 10 (2), 25-31.

Alonso, M. y Finn, E. (1997). "On the notion of internal energy". *Physics Education*, 32 (4), 256-264.

Alonso, M.; Gil, D. y Martínez Torregrosa, J. (1992). "Los exámenes de Física en la enseñanza por transmisión y en la enseñanza por investigación", Enseñanza de las Ciencias, 8 (2), 127-138.

Ametller, J. y Pintó, R. (2002). "Students' reading of innovative images of energy at secondary school level". *International Journal of Science Education,* 24 (3), 285-312.

Anderman Lancor, R. (2014). "Using Student-Generated Analogies to Investigate Conceptions of Energy: A multidisciplinary study". *International Journal of Science Education*, 36 (1), 1-23.

Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition.* Harvard Universty Press, London.

Andersson, B. (1984). "Chemical reactions". *Report: Elevperspektiv , nº 12.* Universidad de Göteborg, Göteborg.

Andersson, B. (1986). "Pupils' explanations of some aspects of chemical reactions". *Science Education,* 70, 549–563.

Andersson, B. (1990). "Pupils' conceptions of matter and its transformations". *Studies in Science Education,* 18, 53-85.

Archer, L.; DeWitt, J.; Osborne, J.; Dillon, J.; Willis, B. y Wong, B. (2012). "'Balancing acts': Elementary school girls' negotiations of femininity, achievement and science". *International Journal of Science Education*, 96 (6), 967-989.

Arnau, L. (2009). "La complejidad de la evaluación de competencias". *Aula de Innovación Educativa*, 180, 33-36.

Arnay, J. (1997). "Reflexiones para un debate sobre la construcción del conocimiento en la escuela: hacia una cultura científica escolar". En: Rodrigo, M. J. y Arnay, J. (compiladores). "La construcción del conocimiento escolar". Paidós, Barcelona.

Arnold, M. y Millar, R. (1996). "Learning the scientific 'story': a case study in the teaching and learning of elementary thermodynamics". *Science Education,* 80 (3), 249-281.

Arons, A. B. (1999). "Development of energy concepts in introductory physics courses". *American Journal of Physics,* 67 (12), 1063-1067.

Atkins, P.W. (1999). Química Física. Barcelona. Omega.

Ausubel, D. P. (1983); Novak, J. D. y Hanesian, H. (1983). *Psicología Educativa. Un punto de vista cognitivo.* Trillas, México.

Ayuntamiento de Narón. Información en www.naronconcello.org.

Ayuntamiento de Neda. Información en www.neda.es.

Ayuntamiento de San Sadurniño. Información en www.sansadurnino.es.

Bacas, P. (1997). "Detección de las ideas del profesorado acerca de los conceptos de calor y temperatura". *Alambique,* 13, 109-116.

Banerjee, A. C. (1995). "Teaching Chemical Equilibrium and Thermodynamics to undergraduate general chemistry classes". *Journal of Chemical Education,* 72 (10), 879-887.

Banet, E. (2007). "Finalidades de la educación científica en secundaria: opinión del profesorado sobre la situación actual". *Enseñanza de las Ciencias,* 25 (1), 5-20.

Bañas Sierra, C.; Mellado Jiménez, V. y Ruiz Macías, C. (2003). "Las ideas alternativas del alumnado del primer ciclo de Educación Secundaria Obligatoria sobre la conservación de la energía, el calor y la temperatura". Campo Abierto, 24, 99-126.

Bañas, C.; Mellado, V. y Ruiz, C. (2004). "Los libros de texto y las ideas alternativas sobre la energía del alumnado de primer ciclo de Educación Secundaria Obligatoria". *Caderno brasileiro de ensino de física*, 21 (3), 296-312.

Barak, J.; Gorodetsky, M. y Chipman, D. (1997). "Understanding of energy in biology and vitalistic conceptions". *International Journal of Science Education*, 19 (1), 21-30.

Barberá O. (1992). El papel que desempeñan lasteorias en la Biología. Enseñanza de las ciencias, 10 (1). 32-36.

Barberá, O. y Sanjosé, V. (1990). "Juegos de simulación por ordenador: un útil para la enseñanza a todos los niveles". *Enseñanza de las Ciencias,* 8 (1), 46-51.

Barcelona, U. D. (2002). "Investigación e Innovación en Enseñanza de las Ciencias". Alambique, 34.

BARKER, V. (1995). *A longitudinal study of 16-18 year olds' understanding of basic chemical ideas*. Unpublished D.Phil. thesis, Department of Educational Studies, University of York, York.

Barker, V. (2000). "Beyond appearances: students'misconceptions about basic chemical ideas". *Royal Society of Chemistry,* Londres. También disponible en http://www.chemsoc.org/networks/learnnet/miscon.htm (2ª ed.).

Barker, V. (2001). "Chemical concepts: introducing chemical reactions". *Education in Chemistry,* 38 (6), 147-150

Barker, V. y Millar, R. (1996). "Beginning A-level chemistry students; understanding of basic chemical ideas". *Science Education Research Paper 96/3*. Department of Educational Studies, The University of York, York.

Barker, V. y Millar, R. (2000). "Students' reasoning about basic Chemical Thermodynamics and chemical bonding: what changes occur during a context-based post-16 chemistry course?" *International Journal of Science Education,* 22 (11), 1171-1200.

Barlet, R. y Mastrot, G. (2000). "L'alghorithmisation-refuge, obstacle à la conceptualisation. L'exemple de la thermochimie en 1er cycle universitaire". *Didaskalia*, 17, 123-159.

Barral, F. L. y Fernández, E. G. F. (1992). "Secondary students' interpretations of the process occurring in an electrochemical cell". *Journal of Chemical Education*, 69, 655-657.

Barral, F. M. (1990). "¿Cómo flotan los cuerpos que flotan? Concepciones de los estudiantes". *Enseñanza de las Ciencias,* 8 (3), 244-250.

Barrón, A. (1993). "Aprendizaje por descubrimiento: principios y aplicaciones inadecuadas". *Enseñanza de las ciencias,* 11 (1), 3-11.

Barrow, G. (1988). "Thermodynamics should be built on energy, not on heat and work". *Journal of Chemical Education,* 65 (2), 122-125.

Bartell, L. S. (2001a). "Stories to make Thermodynamics and related subjects more palatable". *Journal of Chemical Education*, 78 (8), 1059-1067.

Bartell, L. S. (2001b). "Apparent paradoxes and instructive puzzles in physical chemistry". *Journal of Chemical Education*, 78 (8), 1067-1069.

Barwise, J. y Etchemendy, J. (1989). "Model-Theoretic Semanties". En Posner, M. I. (Ed.). "Foundations of Cognitive Science. A Bradford Book". The MIT Press, Cambridge, London.

Bascones, J. (1989). "Instrucción para la transición cognoscitiva: el caso de la física". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (1), 3 -11.

Baser, M. y Geban, Ö. (2007). "Effectiveness of conceptual change instruction on understanding of heat and temperature concepts". *Research in Science & Technological Education*, 25 (1), 115-133.

Bastida, M. F.; Ramos, F. y Soto, J. (1990). "Prácticas de laboratorio: ¿una inversión poco rentable?" *Investigación en la Escuela,* 11, 77-92.

Battino, R. (1979). "What Thermodynamics should not be taught to freshmen, or who owns the problem?" *Journal of Chemical Education*, 56 (8), 520-522.

Battino, R. (2007). ""Mysteries" of the First and Second Laws of Thermodynamics". *Journal of Chemical Education*, 84 (5), 753-755.

Bauman, R. P. (1992). "Physics that textbook writers usually get wrong. Heat and energy". *The Physics Teacher*, 30, 353-356.

Bauman, R. P. (1992). "Physics that textbook writers usually get wrong". *The Physics Teacher,* 30, 264-269.

Beall, H. (1994). "Probing student misconceptions in Thermodynamics with in-class writing". *Journal of Chemical Education,* 71 (12), 1056-1057.

Becu-Robinault, K. y Tiberghien, A. (1998). "Integrating experiments into the teaching of energy". *International Journal of Science Education,* 20 (1), 99-114.

Belt, S. T.; Leisvik, M. J.; Hyde, A. J. y Overton, T. L. (2005). "Using a context-based approach to undergraduate chemistry teaching – a case study for introductory physical chemistry". *Chemistry Education Research and Practice*, 6 (3), 166-179.

Benarroch, A. (1989). "La naturaleza "particulativa" de la materia. Un estudio longitudinal de ideas previas". *Publicaciones* , 15, 135-148.

Benarroch, A.; Marín, N. y Perales, J. (1999). "La evolución del conocimiento sobre la naturaleza corpuscular de la materia". En Martínez Losada, C. y García Barros, S. (eds). "La Didáctica de las Ciencias. Tendencias actuales". Servicio de Publicaciones de la UDC, Coruña.

Ben-Zvi, R. (1999). "Non-science oriented students and the second law of thermodynamics". *International Journal of Science Education*, 21 (12), 1251-1267.

Ben-Zvi, R.; Eylon, B. S. y Silberstein, J. (1987). "Students' visualisation of a chemical reaction". *Education in Chemistry,* 24 (4), 117-120.

Ben-Zvi, R.; Eylon, B. y Silberstein, J. (1988). "Theories, principles and laws", *Education in Chemistry*, 25 (3), 89-92.

Ben-Zvi, R.; Silberstein, J. y Mamlok, R. (1993). "A model of thermal equilibrium. A tool for the introduction of Thermodynamics". *Journal of Chemical Education,* 70 (1), 31-34.

Bergquist, W. y Heikkinen, H. (1990). "Students' ideas regarding chemical equilibrium. What written test answers do not reveal". *Journal of chemical Education,* 67 (12), 1000-1003.

Bernard, W. H. (1984). "Internal work: A misinterpretation". *American Journal Physics,* 52 (3), 253-254.

Bertelle, A.; Castro, M.; García, S. y Rocha, A. (2006). "Aportes a la discusión acerca de la formación de docentes en ciencias". En Díaz de Bustamante, J. y Jiménez Aleixandre, M. P. (eds.). "Perspectivas sobre el aprendizaje de las ciencias y de las matemáticas. Estudios en honor del profesor Eugenio García - Rodeja Fernández". Servicio de publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela, España.

Beynon, J. 1990. "Some myths surrounding energy". *Physics Education,* 25, 314-316.

Bickford, F. R. (1982). "Entropy and its role in introductory Chemistry". *Journal of Chemical Education*, 59 (4), 317-318.

Bindel, T. H. (2000). "Understanding electrochemical Thermodynamics through entropy analysis". *Journal of Chemical Education*, 77 (8), 1031-1034.

Bindel, T. H. (2004). "Teaching entropy analysis in the first-year High School course and beyond". *Journal of Chemical Education,* 81 (11), 1585-1594.

Blanco, A.; España, E. y González, F. J. (2010). "Un proyecto de investigación para el fomento de la competencia científica en la educación obligatoria". En Quesada, A. y Abril, A. (eds.). "Actas de los XXIV Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales", 729-735.

Bodner, G. M. (1986). "Constructivism: A Theory of Knowledge". *Journal of Chemical Education,* 63 (10), 873-878.

Bodzin, A. (2012). "Investigating Urban Eighth-Grade Students' Knowledge of Energy Resources". *International Journal of Science Education*, 34 (8), 1255-1275.

Boo, H. K. (1998). "Students' understanding of chemical bonds and energetics of chemical reactions". *Journal of Research in Science Teaching,* 35 (5), 569-581.

Boo, H. K. y Watson, J. R. (2001). "Progression in high school students' (aged 16-18) conceptualizations about chemical reactions in solution". *Science Education* 85, 568-585.

Boohan, R. y Ogborn, J. (1996). "Differences, energy and change: a simple approach through pictures". *School science Review,* 78 (283), 13-19.

Bordogna, C.; Cappannini, O.; Cotignola, M. y Punte, G. (2001). "La innovación como proceso: Aplicación a temas introductorios de termodinámica". *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 18 (1), 65-84.

BouJaoude, S. (1991). "A study of the nature of students' understandings about the concept of burning". *Journal of Research in Science Teaching,* 28 (8), 689-704.

Boyd, S. L. (2007). "Puzzling through General Chemistry: A Light-Hearted Approach to Engaging Students with Chemistry Content". *Journal of Chemical Education*, 84 (4), 619-621.

Boyes, E. y Stanisstreet, M. (1990a). "Misunderstandings of 'law' and 'conservation': A study of pupils' meanings for these terms". *School Science Review,* 72 (258), 51-57.

Boyes, E. y Stanisstreet, M. (1990b). "Pupils' ideas concerning energy sources". *International Journal of Science Education*, 12 (5), 513-529.

Bravo Torija, B. y Jiménez Aleixandre, M. P. (2012). "Operaciones en el uso de pruebas en la resolución de un problema de acuicultura. Simposio 1. Desarrollo de las competencias de uso de pruebas, modelización y autoevaluación". *Libro de actas del XXV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 49-57. Santiago de Compostela, 5, 6 y 7 de septiembre de 2012. Editor: Domínguez Castiñeiras, J. M.

Bravo, B.; Puig, B. y Jiménez-Aleixandre, M. P. (2009). "Competencias en el uso de pruebas en argumentación". *Educación química*, 20, 137-142.

Brincones, I. (1990). "Aportaciones de la teoría de los esquemas al aprendizaje de la física". En Escudero, T. y otros. "Aspectos didácticos defísica y química (física) 4". I.C.E. de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

Bromme, R. (1988). "Conocimientos Profesionales de los Profesores". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (1), 9-29.

Brook, A y Driver, R. (1984). *Aspects of secondary students' understanding of energy*. Children's Learning Science Project, University of Leeds.

Brook, A. (1986). "Children's understanding of ideas about energy: a review of the literature". En Driver, R.; y Millar, A. C. "Energy matters". Universidad de Leeds, Leeds.

Brook, A.; Briggs, H.; Bell, B. y Driver, R. (1984). "Aspects of Secondary Students' Understanding of Heat: Full Report". *CLIS: Children's Learning in Science Project*. Centre for Studies in Science and Mathematics Education, Universidad de Leeds, Londres.

Brosnan, T. (1990). "Calculating entropy changes at different extents of reaction". *Journal of Chemical Education*, 67 (1), 48-50.

Brown, H. I. (1988). *La nueva filosofía de la ciencia.* Tecnos, Madrid.

Buckingham, A. D. (1996). *Los principios de la Termodinámica y sus aplicaciones*. Editorial Alhambra, S. A., 1ª ed. española, Colección Exedra, Madrid.

Bunge, M. (1976). *La investigación científica.* Ariel, 5ª ed., Barcelona.

Bunge, M. (1981). *La ciencia: su método y su filosofía.* Siglo XX, Buenos Aires.

Bunge, M. (1999). "La energía entre la física y la metafísica". *Revista Española de Física,* 12 (1), 53-56.

Bunge, M. (2000). "Energy: Between physics and metaphysics". *Science & Education,* 9, 457-461.

Burgess, A. E. (2003). "The A to G of Chemical Equilibrium. Aspects Depicted by Helmholtz Energy Using Its Relationship to Gibbs Energy". *Journal of Chemical Education*, 80 (12), 1476-1481.

Bybee, R. W. y Fuchs, B. (2006). "Preparing the 21st century workforce: A new reform in science and technology education". *Journal of Research in Science Teaching*, 43 (4), 349-352.

Caamaño, A. (1992). "Los trabajos prácticos en ciencias experimentales. Una reflexión sobre sus objetivos y una propuesta para su diversificación". *Aula,* 9, 61-68.

Caamaño, A. (2003). "Las Ciencias en el Bachillerato: ¿una opción en declive?" *Alambique*, 36, 5-10.

Caamaño, A. (2003). "Modelos híbridos en la enseñanza y en el aprendizaje de la Química". *Alambique*, 35, 70-81.

Caballer, M. J.; Carrascosa, J. y Puig, L. (1986). "Establecimiento de las líneas de investigación prioritarias en la didáctica de las ciencias y de las matemáticas". *Enseñanza de las Ciencias,* 4 (2), 136-144.

Cachapuz, A. F. y Martins, I. P. (1987). "High school students' ideas about energy of chemical reactions". *Proceedings of the Second International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics (III).* Cornell University. Novak, J.; Helm, H.

Çalik, M. A. (2005). "A review of solution chemistry studies: insights into students' conceptions". *Journal of Science Education and Technology,* 14 (1), 29-50.

Callen, H. B. (1981). *Termodinámica. Introducción a las teorías físicas de la termostática del equilibrio y de la Termodinámica irreversible.* Ediciones A.C., Madrid.

Camacho, M. y Good, R. (1989). "Problem solving and chemical equilibrium: successful vs. unsuccessful performance". *Journal of Research in Science Teaching ,* 26 (3), 251-272.

Campanario, J. (2004). "El enfoque conexionista en psicología cognitiva y algunas aplicaciones sencillas en didáctica de las ciencias". *Enseñanza de las ciencias*, 22 (1), 93-104.

Campanario, J. M. (2001). "¿Qué puede hacer un profesor como tú o un alumno como el tuyo con un libro de texto como este? Una relación de actividades poco convencionales". *Enseñanza de las ciencias*, 19 (3), 351-364.

Campanario, J. M. (2003). "De la necesidad, virtud: cómo aprovechar los errores y las imprecisiones de los libros de texto para enseñar física". *Enseñanza de las Ciencias,* 21 (1), 161-172.

Campanario, J. M. y Otero, J. C. (2000). "Más allá de las ideas previas como dificultades de aprendizaje. Las pautas de pensamiento, las concepciones epistemológicas y las estrategias metacognitivas de los alumnos". *Enseñanza de las Ciencias,* 18 (2), 155-169.

Campbel, D. y Stanley, J. (1979). *Diseños experimentales y cuasi-experimentales en la investigación social.* Amorrortu, Buenos Aires.

Campbell, J. A. (1979). "What Thermodynamics should be taught to freshmen, or what is the goal?" *Journal of Chemical Education*, 56 (8), 520-522.

Canagaratna, S. G. y Maheswaran, M. (2013). "Thermodynamics on the molality scale". *Journal of Chemical Education*, 90 (5), 598-603.

Candel Rosell, A.; Satoca Valero, J. y Soler Llopis, J. B. (1984). "Interpretación errónea del concepto de entropía (revisión del concepto de orden)". *Enseñanza de las Ciencias,* 2 (3), 198-201.

Cañal, P. (2012). "¿Cómo evaluar la competencia científica en el aula?" *Alambique*, 72, 75-83.

Cañas, A.; Martín-Díaz, M. J. y Nieda, J. (2008). "¿Debería nuestro currículo adaptarse más a la competencia científica de PISA?" *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 57, 41-52.

Cañas, A.; Martín-Díaz, M. J. y Nieda, J. (2009). "Definición y secuenciación de la competencia científica en la LOE". *Aula de Innovación Educativa*, 186, 7-9.

Cañas, A.; Martín-Díaz, M. y Nieda, J. (2007). *Competencia en el conocimiento y la interacción con el mundo físico. La competencia científica.* Alianza Editorial, Madrid.

Carabana, J. (2008). "PISA 2006: sin novedad". *Claves de Razón Práctica*, 179, 22-29.

Cárdenas, M. y Ragout de Lozano, S. (1996). "Explicaciones de procesos termodinámicos a partir del modelo corpuscular: una propuesta didáctica". *Enseñanza de las Ciencias,* 14 (3), 343-349.

Carpenter, D. K. (1996). "A Controversy about the Gibbs function - Introduction to the paper symposium". *Journal of Chemical Education*, 73 (5), 384-386.

Carr, M. (1984). "Model confusion in chemistry". *Research in Science Education,* 14, 97-103.

Carrascosa, J. (1985). "Errores conceptuales en la enseñanza de la física y la química: una revisión bibliográfica". *Enseñanza de las Ciencias,* 3 (3), 230-234.

Carretero, M. (1993). *Constructivismo y educación*. Edelvives, Zaragoza.

Carretero, M. y Limón, M. (1996). "Problemas actuales del constructivismo: de la teoría a la práctica". En Rodrigo, M. J. y Rodrigo i Arnay, J. (eds). "La construcción del conocimiento escolar". Ecos de un debate.

Carson, E. M. y Watson, J. R. (1999). "Undergraduate students' understanding of enthalpy change". *University Chemistry Education,* 3 (2), 46-51.

Carson, E. M. y Watson, J. R. (2002). "Undergraduate students' understandings of entropy and Gibbs free energy". *University Chemistry Education,* 6, 4-12.

Caruso, F.; Castro, M.; Domínguez Castiñeiras, J. M.; García-Rodeja, E.; Iturralde, C.; Rocha, A. y otros. (1998). "Construcción del concepto de reacción química". *Educación química,* 9 (3), 151-155.

Carvalho, E. O.; Araki, M. K.; Freitas, S. F.; de Godoy, C. M. G.; Faljoni-Alario, A.; Frare-Junior, P. L. y Nantes, I. L. (2009). "A Novel Tool to Facilitate the Learning of Thermodynamic Principles by Undergraduate Students of the Biological Area". *Biochemistry and molecular biology education*, 37 (5), 271-278.

Casella, A. y Giuliani, G. (1999). "Scientific thought and common sense". *5th International History, Philosophy and Science Teaching Conference & Annual Meeting of the FEstory of Physics Group of the Italian Association of Physics School Teachers,* 15-19. September, Como-Pavia. También disponible en la web: http://fisica.unipv.it/percorsi/pdf/como_eng_2.pdf.

Castrillón Ruiz, A. (2013). "Propuesta de enseñanza para favorecer la adquisición de lenguaje científico del tema calorimetría en estudiantes de octavo grado de la Institución Educativa Fe y Alegría La Cima de Medellín. Monográfico nº 11784". Hemeroteca Nacional Carlos Lleras Restrepo, Bogotá D.C. (Colombia).

Castro, E. A. (1992). "El empleo de modelos en la enseñanza de la Química". *Enseñanza de las Ciencias,* 10 (1), 73-79.

Catalán, A. y Catalany, M. (1986). "Contra el mito de la neutralidad de la ciencia: el papel de la historia". *Enseñanza de las ciencias,* 4 (2), 163-166.

Cervantes Espinosa, L.; Delgado Herrera, T.; Flores Almazán, S. y Trejo Candelas, L. M. (2005). "El modelo del calor latente de fusión. Regulación de su aprendizaje en la etapa formativa". *Enseñanza de las Ciencias*, nº extraordinario (VII Congreso), 1-5.

Cervantes Madrid, A.; Perales Palacios, F. J. y Vílchez González, J. M. (2012). "La Energía en la Interacción Térmica: Una propuesta de intervención en el Máster de Profesorado de Secundaria mediante secuencias estructuradas de contenido". *Actas del XXV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 1043-1050. Ápice, Santiago de Compostela.

Cervantes, A. (1987). "Los conceptos de calor y temperatura: una revisión bibliográfica". *Enseñanza de las Ciencias,* 5 (1), 66-70.

Cervantes, L.; de la Torre, N.; Verdejo, A.; Trejo, L. M.; Córdova, J. L. y Flores, F. (2001). "El concepto de calor en termodinámica y su enseñanza". *Memorias del XVI Congreso Nacional de Termodinámica,* 558-565. Universidad de Colima y SMT.

Chalmers, A. F. (1987). *¿Qué es esa cosa llamada ciencia? Una valoración de la naturaleza y el estatuto de la ciencia y sus métodos.* Siglo XXI, Madrid.

Chamizo, J. A. y Izquierdo, M. (2007). "Evaluación de las competencias de pensamiento científico". *Alambique*, 51, 9-19.

Chang, R. (1998). *Química.* Mc Graw Hill, Méjico. Traducción castellana de la sexta edición en inglés de Mc Graw Hill. USA.

Chang, W. (2011). "Teaching the First Law of Thermodynamics via realLife examples". *The Physics Teacher*, 49 (4), 231-233.

Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique.* La Pensée sauvage, Grenoble.

Chi, M. (1992). "Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science". En Giere, R. "Cognitive Models of Science". Universidad de Minnesota, Minneapolis.

Chi, M. T. (2005). "Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust". *Journal of the Learning Sciences,* 14 (2), 161-199.

Chi, M. T. H.; Feltovich, P. J. y Glaser, R. (1981). "Categorization and representation of physics problems by experts and novices". *Cognitive Science,* 5, 121-152.

Chi, M. T.; Slotta, J. y deLeeuw, W. (1994). "From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts". *Learning and Instruction,* 4 (1), 27-43.

Chisholm, D. (1992). "Some energetic thoughts". *Physics Education,* 27, 215-220.

Chu, H.-E.; Treagust, D. F.; Yeo, S. y Zadnik, M. (2012). "Evaluation of Students' Understanding of Thermal Concepts in Everyday Contexts", *International Journal of Science Education*, 34 (10), 1509-1534.

Cindra y Baierl, (2005).

Claxton, G. (1987). *Vivir y aprender. Psicología del desarrollo y del cambio en la vida cotidiana.* Alianza Psicología, Madrid.

Claxton, G. (1994). *Educar mentes curiosas. El reto de la ciencia en la escuela.* Visor, Madrid.

Clement, J. (1993). "Using bridgin analogies and achoring intuitions to deal with Students' preconceptions in Physics". *Journal of Research in Science Teaching,* 30 (10), 1241-1257.

Cleminson, A. (1990). "Establishing an epistemological base for science teaching in the light of contemporary notions of the nature of science and how children leam science". *Journal of Research in Science Teaching,* 27 (5), 429-445.

Clough, E. E. y Driver, R. (1986). "A study of consistency in the use of students' conceptual frameworks across diferent task contexts". *Science Education,* 70 (4), 437-496.

Cohen, I. y Ben-Zvi, R. (1982). "Chemical energy: a learning package". *Journal of Chemical Education*, 1982, 59 (8), 656-659.

Cohen, I. y Ben-Zvi, R. (1992). "Improving student achievement in the topic of chemical energy by implementing new learning materials and strategies". *International Journal of Science Education,* 14 (2), 147-156.

Coll, C. y otros. (1992). *Los contenidos en la Reforma. Enseñanza y aprendizaje de conceptos, procedimientos y actitudes.* Ed. Santillana, Madrid.

Coll, R. K. y Taylor, N. (2001). "Alternative conceptions of chemical bonding held by upper secondary and tertiary students". *Research in Science and Technological Education*, 19 (2),171-191.

Coll, R. K. y Taylor, N. (2002). "Mental models in chemistry: senior chemistry students' mental models of chemical bonding". *Chemistry Education: research and practice in Europe* , 3 (2), 175-184.

Coll, R. K. y Treagust, D. F. (2001a). "Learners' mental models of chemical bonding". *Research in Science Education,* 31, 357–382.

Coll, R. K. y Treagust, D. F. (2001b). "Learners' use of analogy and alternative conceptions for chemical bonding". *Australian Science Teachers Journal,* 48 (1), 24-32.

Coll, R. K. y Treagust, D. F. (2003). "Investigation of secondary school, undergraduate and graduate learners' mental models of ionic bonding". *Journal of Research in Science Teaching,* 40 (5), 464-486.

Colombo, J.; Salinas, J. y Pesa M. (1991). "La generación autónoma de "conflictos cognitivos', para favorecer cambios de paradigmas en el aprendizaje de las ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 9 (3), 237-242.

Contreras, L. C. (1987). "La resolución de problemas, ¿una panacea metodológica?" *Enseñanza de las Ciencias,* 5 (1), 49-52.

Cordero, S.; Colinvaux, D. y Dumrauf, A. G. (2002). "¿Y si trabajan en grupo...? Interacciones entre alumnos, procesos sociales y cognitivos en clases universitarias de Física". *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (3), 427-441.

Cortel Ortuño, A. (1999). "Demostraciones en el aula. Explosiones a pequeña escala". *Alambique*, 20, 105-115.

Cosgrove, M. y Osborne, R. (1991). "Modelos didácticos para cambiar las ideas de los alumnos". En Osborne, R. y Freyberg, P. "El Aprendizaje de las Ciencias. Implicaciones de la Ciencia de los Alumnos". Narcea, Madrid.

Cotignola, M. I.; Bordogna, C.; Punte, G. y Cappannini, O. M. (2002). "Difficulties in learning thermodynamic concepts: are they linked to the historical development of this field?" *Science & Education,* 11, 279-291.

Couce, A.; Domínguez, J. y Álvarez, V. (1998). "Argumentación del alumnado de 2º de E.S.O. sobre un problema relacionado con la formación de sombras". *XVIII Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales,* 273-285. La Coruña.

Covaleda, R.; Moreira, M. A. y Caballero, M. C. (2005). "Los significados de los conceptos de sistema y equilibrio en el aprendizaje de la mecánica. Estudio exploratorio con estudiantes universitarios". *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias,* 4 (1), 1-27.

Craig, N. C. (2003). "Campbell's Rule for Estimating Entropy Changes in Gas-Producing and Gas-Consuming Reactions and Related Generalizations about Entropies and Enthalpies". *Journal of Chemical Education*, 80 (12), 1432-1436.

Craig, N. C. (2005). "Let's Drive "Driving Force" Out of Chemistry". *Journal of Chemical Education*, 82 (6), 827-828.

Craig, N. C. y Gislason, E. A. (2002). "First law of thermodynamics; irreversible and reversible processes". *Journal of Chemical Education*, 79 (2), 193-200.

Cros, D.; Maurin, M.; Amouroux, R.; Chastrette, M.; Leber, J. y Fayol, M. (1986). "Conceptions of first-year university students of the constituents of matter and the notions of acids and bases". *European Journal of Science Education,* 8 (3), 305-313.

Cross, R. T. y Price, R. F. (1996). "Science Teachers' social conscience and the role of controversial issues in the teaching of science". *Journal of Research in Science Teaching,* 33 (3), 319-333.

Cunningham, C. (1996). "Knowing and teaching about science teachers' sociological understanding of science". *Paper presented at the annual meeting of NARST*. St. Louis. MO. April.

De Berg, Â. K. Â. C. (2008). "The concepts of heat and temperature: the problem of determining the content for the construction of an historical case study which is sensitive to nature of science issues and teaching-learning issues". *Science & Education*, 17 (1), 75-114.

De Berg, K. C. (1997). "The development of the concept of work: a case where history can inform pedagogy". *Science & Education, 6*, 511-527.

De Posada, J. M. (1999). "The presentation of metallic bonding in high school science textbooks during three decades: science educational reforms and substantive changes of tendencies". *Science Education,* 83, 423-447.

De Pro Bueno, A. (2009). ""El uso de los recursos energéticos". Una unidad didáctica para la asignatura Ciencias para el Mundo Contemporáneo". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6 (1), 92-116.

De Pro, A. (2003). "La construcción del conocimiento científico y los contenidos de ciencias". En Jiménez A. M. P. (coord.). "Enseñar ciencias". Graó.

De Pro, A. (2011). "¿Qué investigamos sobre la Didáctica de las Ciencias Experimentales en nuestro contexto educativo?" *Investigación en la escuela*, 69, 45-59.

De Pro, A. (2012). "¿Desarrollar competencias matemáticas en las clases de Ciencias?" *Alambique*, 70, 54-65.

De Pro, A. (coord.) (2008b). "Monográfico: Los nuevos currículos en bachillerato". *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, 56, 87-97.

De Vos, W. y Verdonk, A. H. (1986). "A new road to reaction part 3: Teaching the heat effect of reactions". *Journal of Chemical Education*, 63, 972-974.

De Vos, W. y Verdonk, A.H. (1996). "The particulate Nature of Matter in Science Education and in Science". *Jounal of Research in Science Teaching,* 33 (6), 57-64.

Del Carmen, L. (1987). "La investigación en el aula: análisis de algunos aspectos metodológicos". *Investigación en la Escuela,* 1, 51-56.

Del Carmen, L. (1995). "Enfoques investigativos en la enseñanza y secuenciación de contenidos". *Investigación en la Escuela,* 25, 17-25.

Del Carmen, L. (1997). *La Enseñanza y el Aprendizaje de las Ciencias de la Naturaleza en la Educación Secundaria.* ICE-Horsori, Barcelona.

Del Carmen, L. y Jiménez, M. P. (1997). "Los libros de texto: un recurso flexible". *Alambique*, 11, 7-14.

Del Val, J. (1991). *Crecer y pensar: la construcción del conocimiento en la escuela.* Paidós, Barcelona.

Del Val, J. (1997). "Tesis sobre el constructivismo". En Rodrigo, M. J. y Arnay, J. (comp.). "La construcción del conocimiento escolar", 15-24. Paidós, Barcelona.

Delgado, T.; Flores, S. y Trejo, L. M. (2002). "Calor latente. Propuesta de enseñanza del concepto. Trabajo en extenso". *Memorias del evento XVII Congreso Nacional de Termodinámica,* 586-591. México D. F., del 9 al 13 de septiembre de 2002.

Díaz Armentia, M. A. y de Pro Bueno, A. (2003). "Una Física vieja en un nuevo Bachillerato". *Alambique*, 36, 25-31.

Díaz, J. (1999). Tese de Doutoramento. *Problemas de aprendizaje en la interpretación de observaciones de estructuras biológicas con el microscopio*. Departamento de Didáctica das Ciencias Experimentais. Universidade de Santiago de Compostela. Servicio de Publicacións da USC, Santiago de Compostela.

Díaz, J. y Jiménez, M. (1999). "Aprender ciencias, hacer ciencias: resolver problemas en clase". *Alambique,* 20, 9-16.

Diemente, D. (1998). "Closer Look at the Addition of Equations and Reactions". *Journal of Chemical Education*, 75 (3), 319-321.

DiSessa, A. y Sherin, B. (1998). "What changes in conceptual change?" International Journal of Science Education, 20 (10), 1155-1191.

Dixon, J. R. M. y Emery, A. H. (1965). "Semantics, operationalism and the molecular-statistical model in thermodynamics". *American Scientist*, 53, 428-436.

Doige, C. A. y Day, T. (2012). "A Typology of Undergraduate Textbook Definitions of 'Heat' across Science Disciplines". *International Journal of Science Education*, 34 (5), 677-700.

Doménech Blanco, J. L. (2000). Tesis Doctoral. *L'ensenyament de l'energia en l'educació secundària. Anàlisi de les dificultats i una proposta de millora*. Universidad de Valencia, Valencia.

Doménech, J. L. L.; Gil-Pérez, D.; Gras, A.; Guisasola, J.; Martínez-Torregrosa, J.; Salinas, J.; Trumper, R. y Valdés, P. (2003). "La enseñanza de la energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global". *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20 (3), 285-310.

Doménech, J. L.; Doménech, M. A. y Martínez, J. (1993). "¿Es posible unificar el principio de conservación de la energía en mecánica y en termodinámica?" *Enseñanza de las Ciencias,* nº extraordinario, 225-226.

Domenech, J. L.; Gil-Perez, D.; Gras-Martí, A.; Guisasola, J.; Martínez-Torregrosa, J.; Salinas, J.; Vilches A. (2007). "Teaching of energy issues: A debate proposal for a global reorientation". *Science & Education*, 16, 43–64.

Doménech, J. L.; Limiñana, R. y Menargues, A. (2013). "La superficialidad en la enseñanza del concepto de energía: una causa del limitado aprendizaje alcanzado por los estudiantes de Bachillerato". *Enseñanza de las Ciencias*, 31 (3), 103-119.

Domínguez Castiñeiras, J. M. (2000). Tesis Doctoral. *Evolución de las formas de hacer y de pensar sobre un sistema material, en el marco de la termodinámica y del modelo de partículas. Estudio mediante esquemas de acción y de razonamiento.* Servicio de Publicaciones de la USC, Santiago de Compostela.

Domínguez Castiñeiras, J. M. (2001). "Fundamentos para la planificación de una propuesta didáctica en la E.S.O. Cambios en un sistema material". *ADAXE. Revista de estudios e experiencias educativas,* 17, 311-336.

Domínguez Castiñeiras, J. M. (2007). *Actividades para la enseñanza en el aula de ciencias. Fundamentos y planificación.* Ediciones UNL, Secretaría de extensión, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe.

Domínguez Castiñeiras, J. M. y Álvarez, V. (2001). "La formación inicial del profesorado de Física y Química de Educación Secundaria, en la Universidad de Santiago de Compostela". *Revista Interuniversitaria de Formación de Profesorado* 40, 81-96.

Domínguez Castiñeiras, J. M. y de Pro Bueno, A. (2005). "Estrategia para evaluar la evolución del conocimiento del alumnado: esquemas de pensamiento (razonamiento y acción)". *Enseñanza de las ciencias*, nº extraordinario (VII Congreso), 1-5.

Domínguez Castiñeiras, J. M. y de Pro Bueno, A. (2006). "A Metodoloxía AcAb. Unha Proposta Didáctica para o ensino-aprendizaxe das Ciencias". En P. s. Matemáticas, Díaz, y Jiménez Aleixandre, M. P. Dpto. de Didáctica de las Ciencias Experimentales, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.

Domínguez Castiñeiras, J. M.; García-Rodeja Fernández, E. y de Pro Bueno, A. (2003). "El uso de modelos en la enseñanza-aprendizaje de la Física". *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales,* 35, 53-59.

Domínguez Castiñeiras, J. M.; García-Rodeja, E.; Pro, A. y Illobre, M. L. (2001). "Propuesta de Enseñanza para el estudio de los cambios producidos en un sistema material desde la termodinámica y el modelo cinético de partículas". *ADAXE. Revista de estudios e experiencias educativas* 17, 337-361.

Domínguez Castiñeiras, J. M.; Pro, A. y García-Rodeja, E. (2003). "Esquemas de razonamiento y de acción de estudiantes de ESO en la interpretación de los cambios producidos en un sistema material". *Enseñanza de las Ciencias,* 21 (2), 199-214.

Domínguez Castiñeiras, J. M.; Pro, A.; García-Rodeja, E. e Illobre, L. (1999). "Esquemas de razonamiento del alumnado de E.S.O.: interpretación del posible comportamiento de un sistema cuando intercambia energía con una fuente". En Martínez Losada, C. (Ed.) "La Didáctica de las Ciencias. Tendencias actuales". Servicio de Publicaciones de la UDC, La Coruña.

Domínguez Castiñeiras, J. M.; Pro, A.; García-Rodeja, E. y Illobre, M. L. (1998a). "Esquemas conceptuales de los alumnos de secundaria sobre el modelo de partículas de la materia". En Banet, E. y Pro, A. (Edits). "Investigación e Innovación en la Enseñanza de las Ciencias", II. DM, Murcia.

Domínguez J. M.; García-Rodeja, E.; Pro, A. e Illobre, M. L. (1996). "Explorando procedementos: o termómetro. *Boletín das Ciencias,* 28, 63-74.

Domínguez, J. M. e Illobre, M. L. (1997). "Calefacción y refrigeración". En Jiménez et al. (coordinadores). "Aprendiendo Ciencias en la Enseñanza Secundaria". Servicio de Publicacións e Intercambio Científico da U.S.C., Santiago de Compostela.

Domínguez, J. M.; de Pro Bueno, A.; García-Rodeja Fernández, E. e Illobre González, M. L. (1998-1999). "Los esquemas de acción y la evaluación de conocimiento procedimental. La medida de la temperatura en la E.S.O." *Adaxe*, 14 (15), 233-270.

Domínguez, J. M.; García-Rodeja, E.; Arias, M. T.; Illobre, M. L.; Martínez, G.; Otero, M. y otros. (1994). "Concepcións dos alumnos sobre mecánica clásica. Implicacións no deseño dun currículum de Ciencias: proxecto AcAb Física". En Montero, L. y Vez, J. M. (Edits). "Las Didácticas Específicas en la Formación del Profesorado", I. Tórculo Artes Gráficas, Santiago de Compostela.

Domínguez, J. M.; García-Rodeja, E.; Illobre, M. L.; Castro Fucci, M.; García, S. y Rocha, A. (1995). "¿Utilizan os estudiantes o modelo de partículas da materia na explicación de fenómenos relacionados coa Termodinámica?" *Boletín das Ciencias,* 24, 123-127.

Domínguez, J. M.; García-Rodeja, L.; Jiménez, M. P. y Lorenzo, F. (1990). "A profesión docente en ciencias". *Boletín das Ciencias,* 7, 23-27.

Domínguez, J. M.; Pro, A.; García-Rodeja, E. y Illobre, M. L. (1998-99c). "Os esquemas de acción e a avaliación do coñecemento procedimental. A medida da temperatura na E.S.O." *ADAXE. Revista de Estudios e Experiencias Educativas,* 14 (15), 233-270.

Domínguez, J.; De Pro, A. y García, E. (1998b). "Las partículas de la materia y su utilización en el campo conceptual de calor y temperatura: un estudio transversal". *Enseñanza de las Ciencias,* 16 (3), 461-475.

Drago, A. (1994). "Mach's thesis: Thermodynamics as the basic theory for physics teaching". *Science & Education,* 3, 189-198.

Driver, R. (1981). "Pupils' alternative frameworks in science". *European Journal of Science Education,* 3 (1), 93-101.

Driver, R. (1986). "Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos". *Enseñanza de las Ciencias,* 4 (1), 3-15.

Driver, R. (1988). "Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículo en ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (2), 109-119.

Driver, R. y Bell, B. (1986). "Students' thinking and the learning of science: A constructivist view". *School Science Review,* 67, 443-456.

Driver, R. y Oldham, V. (1986). "A Constructivist Approach to Curriculum Development in Science". *Studies Science Education,* 13, 105-122.

Driver, R. y Warrington, L. (1985). "Students' use of the principle of energy conservation in problem situations". *Physics Education,* 20, 171-176.

Driver, R.; Asoko, H.; Leach, J.; Mortimer, E. y Scott, P. (1994). "Constructing scientific knowledge in the classroom". *Educational Researcher,* 23 (7), 5-12.

Driver, R.; Brook, A. y Briggs, H. (1990). *Research on students' conceptions in Science: bibliografy*. CLIS Research Group. Lecds.

Driver, R.; Guesne, E. y Tiberghien, A. (1989). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia.* Morata, MEC, Madrid.

Driver, R.; Newton, P. y Osborne, J. (2000). "Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms". *Science Education*, 84 (3), 287-312.

Duit R. y Treagust, D. F. (1998). "Learning in science – From behaviourism towards social constructivism and beyond". En Fraser y Tobin (eds). International Handbook of Science Education. Kluwer, London.

Duit, R. (1981). "Understanding energy as a conserved quantity - remarks on the article by R. U. Sexl". *European Journal of Science Education,* 3 (3), 281-301.

Duit, R. (1984). "Learning the energy concept in school-empirical results from The Philippines and West Germany". *Physics Education,* 19, 59-66.

Duit, R. (1986). "In search of an energy concept". En Driver, R.; y Millar, R. "Energy matters". Universidad de Leeds, Leeds.

Duit, R. (1987). "Should energy be illustrated as something quasi-material?" *International Journal of Science Education,* 9, 139-145.

Duit, R. (1994). "Research on studentsconceptions - developments and trends". En: Pfúndt, H. y Duit, R. "Bibliography: students' alternative frameworks and science education". Kiel, IPN at the University of Y.-Kiel, 4111 ed., Germany.

DUIT, R. (1996). "The constructivist view in science education. What it has to offer and what should not be expected from it". *Investigaçôes em ensino de ciências,* 1, 40-75.

Duit, R. (2004). *Bibliography: Students' and teachers' conceptions and science education (STCSE).* Leibniz Institute for Science Education (IPN) - Universidad de Kiel, Kiel (Germany).

Duit, R. (Comp.) (2006). *Bibliography – STCSE. Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. IPN-Kiel, Kiel. Disponible también en http://ipn.unikiel.de/aktuell/stcse/stcse.html, y consultada el 2/10/2006.

Duit, R. y Häussler, P. (1994). "Learning and teaching energy". En Fensham, P.; Gunstone, R.; y White, R. "The content of science: a constructivist approach to its teaching and learning", 185-200. Farmer Press, Londres.

Duit, R. y Kesidou, S. (1988). "Students' understanding of basic ideas of the second law of Thermodynamics". *Research in Science Education*, 18, 186-195.

Dumrauf, A. G. y Cordero, S. (2004). "¿Qué cosa es el calor? Interacciones discursivas en una clase de Física". *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3 (2), 123-147.

Duprez, C. y Méheut, M. (2003). Reversibilité d'une transformation: les critères des étudiants. «Recherches en Didactique des Sciences et des Techniques: Questions en débat» (3èmes Rencontres Scientifiques de l'ARDIST). Editan: N. Hirtzlin y Paragraphic – Groupe Lienhart, pp. 149-156.

Duprez, C.; Méheut, M. y Kermen, I. (2004). "Historical and didactical approaches of reversibility". *Didaskalia*, 25, 31-61.

Durán García, M. E. y Durán Aponte, E. (2013). "La Termodinámica en los estudiantes de tecnología: una experiencia de aprendizaje cooperativo". *Enseñanza de las Ciencias*, 31 (1), 45-59.

Durán-Aponte, E. y Durán-García, M. (2013a). "Aprendizaje cooperativo en Enseñanza de Termodinámica: estilos de aprendizaje y atribuciones causales". *Revista Estilos de Aprendizaje*, 11 (11), 256-275.

Durán-García, M. E. y Durán-Aponte, E. E. (2013b). "Conceptos de calor y trabajo en un foro electrónico. Efectos de la autoeficacia computacional". *Educación Química*, 24 (2), 247-254.

Duschl, R. (1995). "Más allá del conocimiento: los desafíos epistemológicos y sociales de la enseñanza mediante cambio conceptual". *Enseñanza de las Ciencias*, 13 (1), 3-14.

Duschl, R. (1997). *Renovar la enseñanza de las ciencias. Importancia de las teorías y su desarrollo.* Narcea, Madrid.

Duschl, R. A. (2008a). "Quality Argumentation and Epistemic Criteria". En: Erduran, S. y Jiménez-Aleixandre, M. P.(Editors). "Argumentation in Science Education. Perspectives from Classroom-based Research". Science & Technology Education Library, 35. Springer.

Duschl, R. A. y Gitomer, D. H. (1991). "Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice". *Journal of Research in Science Teaching,* 28 (9), 839-858.

Duschl, R. A. y Gitomer, D. H. (1996). "Project Sepia Desing Principles". *Presentado en el Annual Meeting of AERA*. Nueva York.

Duschl, R. A. y Grandy, R. E. (2008). "Reconsidering the character and role of inquiry in school science: Framing the debates". En Duschl, R. A. y Grandy, R. E. (Edits.). "Teaching scientific inquiry. Recommendations for research and implementation", 1-37. Sense Publishers, Rotterdam.

Duschl, R. A. y Hamilton, R. J. (1998). "Conceptual change in science and in the learning of science". En Fraser, B. J. y Tobin, K. G. International handbook of science education. Kluwer Acadenúe Publisher, Dordrecht (The Netherlands).

Duschl, R. y Erduran, S. (1996). "Modelling the growth of scientific knowledge". En Weldorf, G.; Osborne, J. y Scott, P. "Research in science education in Europe". Farmer Press, Londres.

Ebenezer, J. V. y Fraser, M. D. (2001). "First year chemical engineering students' conception of energy in solution processes: Phenomenographic categories for common knowledge construction". *Science Education* 85, 509-535.

Einstein, A. e Infeld, L. (1986). *La evolución de la Física.* Salvat, Barcelona.

Elliot, J. (1990). *La investigación-acción en educación.* Morata, Madrid.

Ellse, M. (1988). "Transferring not transforming energy". *School Science Review*, 69, 427-437.

Engel, E. y Driver, R. (1986). "A study of consistency in the use of students' conceptual frameworks across different task contexts". Science Education, 70 (4), 473- 496.

Erduran, S. y Jiménez-Aleixandre, M. P. (Editors). (2008a). "Argumentation in Science Education. Perspectives from Classroombased Research". *Science & Technology Education Library*. 35, 91-116. Springer.

Erickson, G. L. (1979). "Children's conceptions of heat and temperature". *Science Education,* 63, 221-230.

Erickson, G. L. (1980). "Children's viewpoints of heat: a second look". *Science Education,* 63 (1), 221-230.

Erickson, G. L. (1989). "Calor y Temperatura. Revisión de las ideas de los alumnos". En Driver, R.; Guesne, E. y Tiberghien, A. "Ideas científicas en la infancia y en la adolescencia". Morata, MEC, Madrid.

Erickson, G. L. y Tiberghien, A. (1989). "Calor y Temperatura. El punto de vista científico". En: Driver et al. Ideas científicas en la infancia y en la adolescencia. MEC. Morata, Madrid.

Erickson, F. (1997). "Métodos cualitativos de investigación sobre la enseñanza". En Wittrock, M. "La investigación de la Enseñanza, II". Capítulo 4. Paidós Educador, Barcelona.

Erlichson, H. (1984). "Internal energy in the first law of thermodynamics". *American Journal Physics*, 52 (7), 623-625.

Erlichson, H. (1986). "Are microscopic pictures part of macroscopic termodynamics". *American Journal Physics,* 54 (7), 665-666.

Escaño, J. y Gil de la Serna, M. (1994). *Cómo se aprende y cómo se enseña.* ICE-Horsori, Barcelona.

Escudero, T. (1985). "Las actitudes en la enseñanza de las ciencias: un panorama complejo". *Revista de Educación,* 278, 5-25.

Escudero. (2007). "Las competencias profesionales y la formación universitaria: posibilidades y riesgos". *Revista de docencia Universitaria (RedU)*, 2 (3), número 1. 20 páginas. También disponible en http://www.redu.um.es/Red_U/1/.

Espíndola, C. y Cappannini, O. (2010). "Marco descriptivo o explicativo: ¿dónde creemos que se sitúan las representaciones de nuestros estudiantes?" *Congreso de Baeza, presentación en formato póster*, 178, Baeza.

Espinosa, J. y Roman, T. (1991). "Actitudes hacia la ciencia y asignaturas pendientes: dos factores que afectan al rendimiento en ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 9 (2), 151-154.

Esteban Santos, S. (2001). *Introducción a la Historia de la Química. Cuadernos de la UNED*. Ediciones de la UNED, Madrid.

EU (2004). Europe needs more scientists! Brussels: European Commission, Directorate-General for Research, Informe del High Level Group on Human Resources for Science and Technology in Europe. Available from: http://europa.eu.int/comm/research/conferences/2004/sciprof/pdf/final_en.pdf (accessed 2005-10-24). EC (2004).

Eurydice. (2011). *Science Education in Europe: National Policies, Practices and Research.* EACEA, Bruselas.

Falk, G.; Herrmann, F. y Schmid, G. (1983). "Energy forms or energy carriers?" *American Journal of Physics*, 51 (12), 1074-1077.

Fernández, E. (1986). "Reflexiones acerca del concepto de calor". *Enseñanza de las Ciencias,* 4 (1), 91-92.

Fernández, I.; Gil, D.; Carrascosa, J.; Cachapuz, A. y Praia, J. (2002). "Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza". *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (3), 477-488.

Feyerabend (1975).

Finegold, M. y Trumper, R. (1989). "Categorizing pupils' explanatory frameworks in energy as a means to the development of a teaching approach". *Research in Science Education*, 19, 97-110.

Flores Almazán, S. A. y Trejo, L. M. (2003). "¿Cómo mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje mediante la evaluación-regulación? El caso de la termodinámica". *Memorias de las Terceras Jornadas Internacionales de Enseñanza Universitaria de la Química.* Universidad Nacional Autónoma de México, La Plata.

Flores Almazán, S. y Miguel Trejo, L. (2008). "¿Cómo construir la competencia de resolución de problemas en termodinámica clásica?" *XXIII EDCE*, 877-887. Almería.

Flores Almazán, S.; Alonso Viveros, G.; Delgado Herrera, T. y Trejo Candelas, L. M. (2005). "Innovación en el laboratorio de termodinámica". *Enseñanza de las ciencias,* nº extraordinario (VII Congreso), 1-5.

Fourez, G. (1994). *La construcción del conocimiento científico: filosofla y ética de la ciencia.* Narcea, Madrid.

Fraser B. y Tobin K. (Eds.). International Handbook of Science Education, 115-116. Kluver, London.

Frederickson, A. G. (1983). "Reference States and Relative Values of Internal Energy, Enthalpy, and Entropy". *Chemical Engineering Education*, 17 (2), 64-69.

Frederik, L; Van Der Valk, T.; Leite, L. y Thorén, I. (1999). "Pre-service Physies Teachers and Conceptual Difficulties on Temperature and Heat". *European Journal of Teacher Education,* 22 (1), 61-74.

Furió, C. (1996). "Las concepciones alternativas del alumnado en ciencias: dos décadas de investigación. Resultados y tendencias". *Alambique,* 7, 7-17.

Furió, C. y Calatayud, M. L. (2000). "Fijación y reducción funcionales como razonamientos de sentido común en el aprendizaje de la química (1): Equilibrio químico". *Revista de Educación en Ciencias,* 1 (1), 6-12.

Furió, C. y Furió-Mas, C. (2000). "Dificultades conceptuales y epistemológicas en el aprendizaje de los procesos químicos". *Educación Química,* 11 (3), 300-308.

Furió, C.; Calatayud, M. L.; Bárcenas, S. L. y Padilla, O. M. (2000). "Functional fixedness and functional reduction as common sense reasonings in chemical equilibrium and in geometry and polarity of molecules". *Science Education,* 84 (5), 545-565.

Furió, C.; Hernández, J.; Solbes, J. y Vilches, A. (2007). "La física y química en las enseñanza mínimas de la enseñanza secundaria obligatoria en la LOE". *Alambique*, *Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 53, 47-58.

Furió, C.; Solbes, J. y Carrascosa, J. (2006). "Las ideas alternativas sobre conceptos científicos: tres décadas de investigación. Resultados y perspectivas". *Alambique,* 48, 64-78.

Furió, C.; Solbes, J. y Furió, C. (2005). "¿Cómo se presentan los conceptos y modelos en la enseñanza de la termoquímica? Visiones distorsionadas de la ciencia en libros de texto". *Enseñanza de las ciencias*, nº extraordinario (VII Congreso), 1-6.

Furió, C.; Vilches, A.; Guisasola, J. y Romo, V. (2001). "Finalidades de la enseñanza de las ciencias en la secundaria obligatoria. ¿Alfabetización científica o preparación propedéutica?" *Enseñanza de las Ciencias*, 19 (3), 365-376.

Furió-Gómez, C.; Solbes, J. y Furió, C. (2006). "Análisis crítico de la presentación del tema de Termoquímica en libros de texto de bachillerato y Universidad". *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales,* 20, 47-69.

Furió-Gómez, C.; Solbes, J. y Furió-Mas, C. (2007). "La historia del primer principio de la termodinámica y sus implicaciones didácticas". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las ciencias*, 4 (3), 461-475.

Gabel, D. (1999). "Improving teaching and learning through Chemistry Education Research: a look to the future". *Journal of Chemical Education,* 76 (4), 548-554.

Gabel, D. L. (eds). (1994). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. MacMillan Pub Co., New York.

Gabel, D. L. y Bunce, D. M. (1994). "Research on problem solving: Chemistry". En Gabel, D. L. "Handbook of research on science teaching and learning", 301-326. Macmillan, Nueva York.

Gabel, D. L.; Samuel, K. V. y Hunn, D. (1987). "Understanding the particulate nature of matter". *Journal of Chemical Education,* 64, 695-697.

Gabel, D. y Samuel, K. V. (1986). "High school students ability to solve molarity problems and their analog counterparts". *Jornal of Research in Science Teaching,* 23, 167-176.

Gabel, D. y Sherwood, R. D. (1984). "Science education research interests of elementary teachers". *Journal of Research in Science Teaching,* 21, 843-851.

Gabriela, M.; Ribeiro, G.; Costa Pereira, D. y Maskill, R. (1990). "Reaction and spontaneity: the influence of meaning from everyday language on fourth year undergraduates' interpretations of some simple chemical phenomena". *International Journal Science Education,* 12 (4), 391-401.

Gagliardi. M. (1988). "Cómo utilizar la historia de las ciencias en la enseñanza de las ciencias". *Enseñanza de las ciencias,* 6 (3), 291-296.

Galagovsky, L. (1993). "Redes conceptuales: base teórica e implicaciones para el proceso de enseñanza aprendizaje". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (3), 301-307.

Galagovsky, L. y Ciliberti, N. (1994). "Redes conceptuales: su aplicación como instrumento didáctico en temas de física". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (3), 338-349.

Gallástegui Otero, J. R. y Lorenzo Barral, F. M. (1993). "El café tiene cafeína y nos despierta, nos da energía: concepciones sobre la energía química, una buena razón para poner de acuerdo a los profesores de Física y Química y Ciencias Naturales". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (1), 20-25.

Gallástegui, J. R. y Lorenzo, F.M. (1991). "Los diagramas de Venn en la enseñanzaaprendizaje de las Ciencias". *Boletín das Ciencias,* 10, 175-179.

Galley, W. C. (2004). "Exothermic bond breaking: a persistent misconception". *Journal of Chemical Education,* 81 (4), 523-525.

García Barros, S.; Martínez Losada, C. y Mondelo Alonso, M. (1996). "La astronomía en la formación de profesores". *Alambique*, 10, 121-127.

García de Cajén, S. (2007). Tesis de Doctorado. *Perfiles argumentativos sobre la transformación de la energía eléctrica en una resistencia óhmica. Currículo, libros de texto y profesorado.* Servicio de Publicaciones de la USC, Santiago de Compostela.

García de Cajén, S. B.; Domínguez, J. M. y García-Rodeja, E. (2001). "Argumentación a partir de un problema auténtico sobre la transformación de la energía eléctrica en una resistencia". *ADAXE. Revista de Estudos e Experiencias Educativas,* 17, 165-190.

García de Cajén, S.; Domínguez Castiñeiras, J. M. y García-Rodeja Fernández, E. (2002). "Razonamiento y Argumentación en Ciencias. Diferentes puntos de vista en el currículo oficial". *Enseñanza de las Ciencias,* 20 (2), 217-228.

García García, J. J. y Rentería Rodríguez, E. (2013). "Resolver problemas: una estrategia para el aprendizaje de la termodinámica". *Revista Guillermo de Ockham*, 11 (2), 117-134.

García, J. L. y Rodríguez, C. (1988). "Ideas previas, esquemas alternativos, cambio conceptual y trabajo en el aula". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (29), 161-166.

García, J. y Perales, J. (2007). "¿Comprenden los estudiantes las gráficas cartesianas usadas en los textos de Ciencias?" *Enseñanza de las Ciencias*, 25 (1), 107-132.

García, S. y Domínguez, J. (2009). "Perfil argumentativo del profesorado cuando resuelve un problema real sobre la transformación de energía eléctrica". *Enseñanza de las Ciencias*, nº extraordinario (VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias), 3042-3046. Barcelona.

García-Rodeja Fernández, E.; Lorenzo Barral, F. M. y Domínguez Castiñeiras, J. M. (1994). *Proyecto AcAb Física. Actividades Abiertas para una Enseñanza Integrada de la Física.* Servicio de Publicaciones de la USC, Santiago de Compostela.

García-Rodeja Fernández, E.; Lorenzo Barral, F. M.; Domínguez Castiñeiras, J. M. y Díaz de Bustamante, J. (1987). *Proyecto AcAb Química. Una visión de la Enseñanza Integrada de la Química por medio de Actividades Abiertas.* Servicio de Publicaciones de la USC, Santiago de Compostela.

García-Rodeja, E.; Díaz, J.; Domínguez, J. M. y Lorenzo, F. M. (1988b). "Proyecto AcAb Química. Análisis conceptual del contenido". *ADAXE. Revista de estudos e experiencias educativas,* 4, 91-101.

García-Rodeja, E.; Domínguez, J. M. y Lorenzo, F. M. (1989a). "Las Actividades Abiertas en el aula: un método de investigación didáctica". *Enseñanza de las Ciencias, nº extraordinario III Congreso* , 2, 201-202.

García-Rodeja, E.; Domínguez, J. M.; Lorenzo, F. M. y Díaz, J. (1988a). "Reseña Histórica del Proyecto AcAb. Hacia un cambio de actitud y de metodología en la Enseñanza de las Ciencias Experimentales". *ADAXE. Revista de estudos e experiencias educativas,* 4, 29-41.

García-Rodeja, E.; Lorenzo, F. M. y Domínguez, J. M. (1989b). "Diseño curricular para la enseñanza de la Física en el nivel 12-16. AcAb Calor y Temperatura". *Enseñanza de las Ciencias, nº extraordinario III Congreso,* 2, 212-215.

Garnett, P. J.; Garnett, P. J. y Hackling, M. W. (1995). "Students' alternative conceptions in chemistry: A review of research and implications for teaching and learning". *Studies in Science Education*, 25, 69-95.

Garret, R. (1988). "Resolución de problemas y creatividad: implicaciones para el currículo de ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (3), 224-230.

Garret, R. (1995). "Resolver problemas en la enseñanza de las ciencias". *Alambique,* 5, 6-15.

Gary, R. K. (2004). "The Concentration Dependence of the ΔS Term in the Gibbs Free Energy Function: Application to Reversible Reactions in Biochemistry". *Journal of Chemical Education*, 81 (11), 1599-1604.

Gayford, C. G. (1986). "Some aspects of the problem of teaching about energy in school biology". *European Journal of Science Education,* 8, 443-450.

Geddis, A. (1991). "Improving the quality of science discourse on controversial issues". *Science Education,* 75, 169-183.

Giere, R. (1999). "Didáctica de la ciencia basada en el agente. Roles para la filosofía de la ciencia y las ciencias cognitivas". *Enseñanza de las Ciencias,* número extraordinario, 5-7.

Giere, R. N. (1994). "The cognitive structure of scientific theories". *Philosophy of Science,* 61, 276-296.

Gil Pérez, D. y Valdés Castro, P. (1997). "La resolución de problemas de física: de los ejercicios de aplicación al tratamiento de situaciones problemáticas". *Revista de Enseñanza de la Física*, 10 (2), 5-20.

Gil Pérez, D. y Vilches, A. (2006). "¿Cómo puede contribuir el proyecto PISA a la mejora de la enseñanza de las Ciencias (y de otras áreas de conocimiento)?" *Revista de Educación*, nº extraordinario, 295-311.

Gil, D. (1986). "La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: Unas relaciones controvertidas". *Enseñanza de las Ciencias,* 4 (2), 111-121.

Gil, D. (1993). "Contribución de la Historia y de la Filosofía de las Ciencias al desarrollo de un modelo de Enseñanza/Aprendizaje como investigación". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (2), 197-212.

Gil, D. y Martínez Torregrosa, J. (1999). "¿Cómo evaluar si se hace ciencia en el aula?" *Alambique,* 20, 17-28.

Gil, D. y Martínez, J. (1987a). *La resolución de problemas de física: una didáctica alternativa.* MEC, Madrid.

Gil, D. y Martínez, J. (1987b). "Los programas guía de actividades: Una concreción del modelo constructivista de aprendizaje de las Ciencias". *Investigación en la Escuela,* 3, 3-12.

Gil, D.; Carrascosa, J. et al. (1999). "¿Puede hablarse de consenso constructivista en la educación científica?" *Enseñanza de las Ciencias,* 17 (3), 503-512.

Gil, D.; Carrascosa, J.; Furió, C. y Martínez Torregrosa, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria. Planteamientos didácticos generales y ejemplos de aplicación en las ciencias fisicoquímicas*. ICE Horsori, Barcelona.

Gil, D.; Dumas, A.; Caillot, M.; Martínez-Torregrosa, J. y Ramírez, L. (1988b). "La resolución de problemas de lápiz y papel como actividad de investigación". *Investigación en la Escuela,* 6, 3-20.

Gil, D.; Furió, C. et al. (1999). "¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio?" *Enseñanza de las Ciencias,* 17 (2), 311-320.

Gil, D.; Martínez, J. Y Senent, F. (1988a). "El fracaso en la resolución de problemas en física: una investigación orientada por nuevos supuestos". *Enseñanza de las ciencias,* 6 (2), 131-146.

Gil, D.; y Carrascosa, J. (1985a). Science learning as a conceptual and methodological change. International Journal of Science Education, 7, 231-236.

Gil, D.; y Carrascosa, J. (1985b). "La metodología de la superficialidad y el aprendizaje de las Ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 3 (2), 113-119.

Gilbert, J. K. y Watts, M. (1983). "Concepts, misconceptions and alternative conceptions: Changing perspectives in Science Education". *Studies in Science Education,* 10, 61-98.

Gilbert, J. y Osborne, R. (1980). "The use of models in Science and Science teaching". *European Journal of Science Education,* 2 (1), 3-13.

Gilbert, J.; De Jong, O.; Justi, R. y Treagust, D. (2002). *Chemical education. Towards a research-based practice.* Kluwer Academic Publishers, Londres.

Gillespie. (1997). "The great ideas of Chemistry". *Journal of Chemical Education,* 74 (7), 882-884.

Giordan, A. (1985). "Interés didáctico de los errores de los alumnos". *Enseñanza de las Ciencias,* 3 (1), 11-17.

Giordan, A. (1989). "Representaciones sobre la utilización didáctica de las representaciones". *Enseñanza de las Ciencias,* 7 (1), 53-62.

Giordan, A. y Vecchi, G. (1988). *Los orígenes del saber. De las concepciones personales a los conceptos científicos.* Diada Editoras, Sevilla.

Gislason, E. A. y Craig, N. C. (2006). "Why do two objects at different temperatures come to a common intermediate temperature when put into contact? Entropy is maximized". *Journal of Chemical Education*, 83, (6), 885-889.

Glasstone, S. (1978). Termodinámica para químicos. Aguilar S.A., 5ª ed., Madrid.

Goedhart, M. J. y Kaper, W. (2002). "From Chemical Energetics to Chemical Thermodynamics". En Gilbert, J. K. et al. (Eds.). "Chemical Education: Towards Research-Based Practice", 339-362.

Goldring, H. y Osborne, J. (1994). "Students' difficulties with energy and related concepts". *Physics Education,* 29, 26-31.

Gómez Crespo, M. A. (2008). "Iniciación a la representación de reacciones químicas". *Alambique* , 57, 93-97.

González, F. M.; Morón, C. y Novak, J. D. (2001). *Errores conceptuales. Diagnosis, tratamiento y reflexiones.* Ediciones Eunate, Navarra.

Gorga, L.; Roso, C. y Vacca, A. M. (1989). "Empleo del computador en la enseñanza del principio fundamental en la dinárnica". *Enseñanza de las Ciencias,* 7 (1), 105-106.

Gorodetsky, M. y Gussarsky, E. (1986). "Misconceptualization of the chemical equilibrium concept as revealed by different evaluation". *European Journal of Science Education,* 8 (4), 427-441.

Granville, M. F. (1985). "Student misconceptions in Thermodynamics". *Journal of Chemical Education,* 62 (10), 847-848.

Greca, I. M. y Moreira, M. A. (1998). "Modelos mentales, modelos conceptuales y modelización". *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, 15 (2), 107-120.

Greca, I. M. y Moreira, M. A. (2001). "Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics". *Science Education,* 86 (1), 106-121.

Greenbowe, T. J. y Meltzer, D. (2003). "Student learning of Thermochemical concepts in the context of solution calorimetry". *International Journal of Science Education,* 25 (7), 779-800.

Grosslight, K.; Unger, C.; Jay, E. y Smith, C. (1991). "Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts". *Jounal of Research in Science Teaching,* 29, 799-822.

Grosz, B. J.; Pollack, M. E. y Sidner, C. L. (1989). "Discourse". En Posner, M. I. (Ed.). "Foundations of Cognitive Science". A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, London.

Gruender, C. D. y Tobin, K. G. (1991). "Promise and prospect". *Science Education,* 75 (1), l-5.

Grupo Axarquía (1990). *Aprendizaje en Física y Química.* Editorial Elzevir, Granada.

Güémez, J. (2010). "¿Es posible una Termodinámica relativista?" *Revista Española de Física,* 24, 47-57.

Güémez, J. (2011). "Termodinámica Relativista: una aproximación didáctica al Primer Principio". *Latin-American Journal of Physics Education*, 5, 72-91.

Guisasola, J. (2008). "La física en el bachillerato LOE: acatar pero no cumplir". *Alambique*, 56, 11-19.

Guisasola, J.; Gras-Martí, A.; Martínez Torregrosa, J.; Alumdí, J. y Becerra, C. (2004). "La Enseñanza universitaria de la Física y las aportaciones en Didáctica de la Física". *Revista Española de Física,* 18 (2), 15-16.

Guruceaga Zubillaga, A. y González García, F. (2011). "Un módulo instruccional para el aprendizaje significativo de la energía". *Enseñanza de las Ciencias*, 29 (2), 175-190.

Gussarsky, E. y Gorodetsky, M. (1988). "On the chemical equilibrium concept: Constrained word associations and conception". *Journal of Research in Science Teaching,* 25 (5), 319-333.

Gustavo, F. (1987). "¿Pueden interpretarse las preconcepciones a la luz de las teorías del aprendizaje?" *Enseñanza de las Ciencias,* 5 (3), 231-234.

Gustone, R. y Watts, M. (1989). "Fuerza y movimiento". En: Osborne, R.; y Freyberg, P. "El aprendizaje de las Ciencias. Implicaciones de la Ciencia de los alumnos". Narcea, Madrid.

Gutiérrez Julián, M. S.; Gómez Crespo, M. A. y Martín-Díaz, M. J. (2008). "¿Basta con decretar un nuevo currículo de química?" *Alambique*, 56, 20-27.

Gutiérrez, J. (2000). "Fundamentos pedagógicos y didácticos". En Perales Palacios, J. y Cañal de León, P. (Edits.). "Didáctica de las Ciencias Experimentales". Marfil, Alcoy.

Gutiérrez, R. (2004). "La modelización y los procesos de enseñanza/aprendizaje". *Alambique*, 42, 8-18.

Gutiérrez, R. (2005). "Polisemia actual del concepto "modelo mental". Consecuencias para la investigación didáctica". *Investigações em Ensino de Ciências*, 10 (2), 209-226. También disponible en http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/.

Gutiérrez, R. y Ogborn, J. (1992). "A causal framework for analysing alternative conceptions". *International Journal of Science Education,* 14 (2), 201-220.

Hackling, M. y Garnett, A. (1985). "Misconceptions of chemical equilibrium". *European Journal of Science Education,* 7 (2), 205-214.

Hackling, M. y Garnett, P. (1985). "Chemical equilibrium: Learning difficulties and teaching strategies". *The Australian Science Teachers Journal,* 31 (4), 8-13.

Hadfield, L. C. y Wieman, C. E. (2010). "Student interpretations of equations related to the first law of thermodynamics". *Journal of Chemical Education*, 87 (7), 750-755.

Halwachs, F. (1983). "La física del profesor: entre la física del físico y la física del alumno". En Coll, C. (comp.). "Psicología genética y aprendizajes escolares", Siglo XXI, Madrid.

Hamilton, T. M. (2003). "Thermodynamics for Visual Learners". *Journal of Chemical Education*, 80 (12), 1425-1427.

Hanson, R. M. y Michalek, B. (2006). "Give Them Money: The Boltzmann Game, a Classroomor Laboratory Activity Modeling Entropy Changes and the Distribution of Energy in Chemical Systems". *Journal of Chemical Education*, 83 (4), 581-588.

Hapkiewicz, A. (1991). "Clarifying chemical bonding: overcoming our alternative conceptions". *The Science Teacher*, 24-27.

Harlen, W. (2002). "Evaluar la alfabetización científica en el programa de la OCDE para la evaluación internacional de estudiantes (PISA)". *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (2), 209-216.

Harrison, A. G. y Treagust, D. F. (2000a). "A tipology of school science models". *International Journal of Science Education,* 22 (9), 1011-1026.

Harrison, A. G. y Treagust, D. F. (2000b). "Learning about atoms. Molecules and chemical bonds: a case study of multiple model use in grade 11 chemistry". *Science Education,* 84, 352-381.

Harrison, A. G.; Grayson, D. J. y Treagust, D. (1999). "Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature". *Journal of Research in Science Teaching,* 36 (1), 55-87.

Hashweh, M. Z. (1986). "Towards an explanation of conceptual change". *European Journal of Science Education,* 8 (3), 229-249.

Head, J. (1985). *The Personal Response to Science.* Cambridge University Press, Londres.

Heath, N. F. (1976). "Heating". *Physics Education,* 11, 388-389.

Hecht, E. (2007). "Energy and change". *The Physics Teacher*, 45, 88-92.

Hernández, F. (2006). "El informe PISA: una oportunidad para replantear el sentido de aprender en la escuela secundaria". *Revista de Educación*, nº extraordinario, 357-379.

Herrán, C. y Parrilla, J. L. (1994). "La utilización del ordenador en la realización de experimentos de laboratorio". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (3), 393-399.

Hesse, J. J. y Anderson, C. W. (1992). "Students' conceptions of chemical change". *Journal of Research in Science Teaching,* 29 (3), 277-299.

Hewson, M. G. (1984). "The influence of intellectual environment on conceptions of heat". *European Journal of Science Education, 6*, 245-262.

Hewson, P. W. (1981). "A conceptual change approach to learning science". *European Journal of Science Education,* 3 (4), 383-396.

Hewson, P. W. (1989). "A aprendizaxe como cambio conceptual". *Revista Galega de Educación,* 10, 20-24.

Hewson, P. W. y Beeth, M. (1995). "Enseñanza para un cambio conceptual: ejemplos de fuerza y movimiento". *Enseñanza de las Ciencias,* 13 (1), 25-35.

Hicks, N. (1983). "Energy is the capacity to do work – or is it?" *The Physics Teacher,* 21, 529-530.

Hierrezuelo Moreno, J. y Montero Moreno, A. (1989). *La ciencia de los alumnos. Su utilización en la didáctica de la Física y Química.* LAIA, MEC, Barcelona.

Hierrezuelo, J. (1986). "Revisión bibliográfica sobre la enseñanza de la energía". *Enseñanza de las Ciencias,* 4 (3), 266-268.

Hierrezuelo, J. M. y Montero, A. (1987). "Consideraciones sobre la enseñanza del calor en 2º de BUP". *Enseñanza de las Ciencias,* 5 (1), 81-83.

Hierrezuelo, J. y Molina, E. (1990). "Una propuesta para la introducción del concepto de energía en el bachillerato". *Enseñanza de las ciencias,* 8 (1), 23-30.

Hierrezuelo, J. y Montero, A. (1988). Energía. En A. COMPLETAR. "La Ciencia de los Alumnos. Su utilización en la Didáctica de la Física y la Química". MEC, Editorial Laia, Barcelona.

Hills, G. L. (1989). "Students "untutored" beliefs about natural phenomena: primitive science or common sense?" *Science Education,* 73 (2), 155-186.

Hodson, D. (1988). "Towards of phylosofically more valid science curriculum". *Science & Education,* 72 (1), 19-40.

Hodson, D. (1990). "A critical look at practical working school science". *School Science Review.* 70 (256), 33-40.

Hodson, D. (1992). "Assesment of practical work: some considerations in philosophy of science". *Science & Education,* 1 (2), 115-144.

Hodson, D. (1994). "Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (3), 299-313.

Hodson, D. (1998). *Teaching and learning science. Towards a personalized approach.* Open University Press, Buckingham.

Hodson, D. (1998b). "Minispecial issue: taking practical work beyond the laboratory". *Diternational Journal of Science Education*. 20 (6). 629-632.

Hodson, D. y Hodson, J. (1998). "From constructivism to social constructivism: vygotskian perspective on teaching and leaming selence". *School Science Review,* 79 (289), 33-41.

Hofstein, A. (1986). *The identification of learning difficulties in Chemistry and ways to overcome them*. Department of Science Teaching, Weizmann Institute of Science, Rehovot.

Hogan y Maglienti, M. (2001). "Comparing the epistemological underpinnings of students and Scientists reasoning about conclusions", *Journal of Research in Science Teaching*, 38 (6), 663-687.

Holman, J. y Pilling, G. (2004). "Thermodynamics in Context; A Case Study of Contextualized Teaching for Undergraduates". *Journal of Chemical Education,* 81 (3), 373-375.

Howard, I. K. (2001). "S Is for Entropy. U Is for Energy. What Was Clausius Thinking?" *Journal of Chemical Education*, 78 (4), 505-508.

Infelta, P. (2002). "The Second Law: Statement and Applications". *Journal of Chemical Education,* 79 (7), 884-888.

Inhelder, B. y Piaget, J. E. (1972). *De la lógica del niño a la lógica del adolescente.* Paldós, Buenos Aires.

International Organization for Standardization (1992). *ISO Standards Handbook. Units of measurement,* 2. International Organization for Standardization, Geneva.

International Union of Pure and Applied Chemistry. (1993). *Quantities, units, and symbol in Physical Chemistry.* Blackwell Scientific Publications, 2ª ed., Oxford.

Iyengar, S. S. y deSouz, R. T. (2014). "Teaching Thermodynamics and Kinetics to advanced general chemistry students and to upper-level undergraduate students using PV diagrams". *Journal of Chemical Education*, 91 (1), 74-83.

Izquierdo, M. (1988). "La contribució de la teoría del flogiste a Festructuració actual de la ciéncia química. Implicacions didáctiques". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (1), 67-74.

Izquierdo, M. (1994). "La V de Gowin, un instrumento para aprender a aprender (y a pensar)". *Alambique,* 1, 114-124.

Jacobson, N. (2001). "Use of Tabulated Thermochemical Data for Pure Compounds". *Journal of Chemical Education*, 78 (6), 814-819.

James, R. K. y Smith, S. (1985). "Alienation of students from science in grades 4-12". Science Education, 69, 39-45.

Jasien, P. G. y Oberem, G. E. (2002). "Understanding of elementary concepts in heat and temperature among college students and K-12 teachers". *Journal of Chemical Education,* 79, 889-895.

Jenkins, E. W. (2005). "Important but not for me: students' attitudes towards secondary school science in England". *Research in Science & Technological Education*, 23 (1), 41-57.

Jensen, W. B. (2000). "The thermodynamics and kinetics of "HeaterMeals" (an exercise in undergraduate inorganic chemistry)". *Journal of Chemical Education*, 77 (6), 713-717.

Jeppsson, F. (2011). "Exploiting language in teaching of entropy". *Journal of Baltic Science Education,* 10 (1), 27-35.

Jiménez Aleixandre, M. P. (1996a). *Dubidar para aprender.* Xerais, Vigo.

Jiménez Aleixandre, M. P. (1996b). *Proyecto docente. Didáctica de las Ciencias de la Vida y de la Tierra.* Universidad de Santiago de Compostela, Compostela.

Jiménez Aleixandre, M. P. (1998). "Diseño curricular: indagación y razonamiento con el lenguaje de las ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 16 (2), 203-216.

Jiménez Aleixandre, M. P. (2000). "Modelos didácticos". En Perales Palacios, F. J. y Cañal de León, P. (Edits.). "Didáctica de las Ciencias Experimentales". Marfil, Alcoy.

Jiménez Aleixandre, M. P. (2003). "Capítulo de Comunicación y lenguaje en la clase de ciencias (Diferencia entre el lenguaje cotidiano y científico)". En Pedrinaci Rodríguez, E.; Caamaño Ros, A.; de Pro Bueno, A. y Oñorbe de Torre, A. "Enseñar ciencias", 55-72. Graó.

Jiménez Aleixandre, M. P. (2003). *Enseñar Ciencias.* Graó, Barcelona.

Jiménez Aleixandre, M. P. (2009). "Competencia científica: poner en práctica los saberes de Ciencias". *Aula de Innovación Educativa*, 186, 6.

Jiménez Aleixandre, M. P. (2010). "10 Ideas Clave. Competencias en Argumentación y Uso de Pruebas". Editorial Graó, Barcelona.

Jiménez Aleixandre, M. P. (2010). "La argumentación contribuye a competencias básicas y objetivos generales de la educación". En. "En 10 Ideas Clave. Competencias en Argumentación y Uso de Pruebas". Editorial Graó, Barcelona.

Jiménez Aleixandre, M. P. y Díaz de Bustamante, J. (2003). "Discurso de aula y argumentación en la clase de ciencias: cuestiones teóricas y metodológicas". *Enseñanza de las ciencias*, 21 (3), 359-370.

Jiménez Aleixandre, M. P. y Gallástegui Otero, J. R. (2008b). "Actividades sobre uso de probas e competencias científicas". *Boletín das ciencias*, ISSN 0214-7807, Ano 21, 66, 163-165.

Jiménez Aleixandre, M. P. y Gallástegui Otero, J. R. (2011). "Argumentación y uso de pruebas: construcción, evaluación y comunicación de explicaciones en Física y Química". En. Caamaño, A. (coord.). "Didáctica de la Física y la Química", 121-139. Graó, 1ª Ed.

Jiménez Aleixandre, M. P. y Puig, B. (2010). "Argumentación y evaluación de explicaciones causales en ciencias: el caso de la inteligencia". *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 63, 11-18.

Jiménez Aleixandre, M. P. y Reigosa, C. (2005). "Contextualizing Practices Across Epistemic Levels in the Chemistry Laboratory". *Science education*, 90 (4), 707-733.

Jiménez Aleixandre, M. P.; Bravo, B. y Puig, B. (2009). "¿Cómo aprende el alumnado a evaluar pruebas?" *Aula de Innovación Educativa*, 186, 10-12.

Jiménez, M. P. (1991). "Cambiando las ideas sobre el cambio biológico". *Enseñanza de las wola Ciencias,* 9 (3), 248-256.

Jiménez, M. P. (2009s). "Competencia científica: poner en práctica los saberes de Ciencias. Presentación del monográfico sobre competencia científica". *Aula de Investigación Educativa*, 186, 6.

Jiménez, M. P. y Sanmartí, N. (1997). "¿Qué ciencia enseñar?: Objetivos y Contenidos en la swer Educación Secundaria". En: Del Carmen, L. (coord.). "La Enseñanza y el Aprendizaje de las Ciencias de la Naturaleza en la Educación Secundaria". ICE-Horsori, Barcelona.

Jiménez, M. P.; Analadejo, C. y Caamaño, A. (1992). *Didáctica de las Ciencias de la Naturaleza. Curso de actualización científica y didáctica*. MEC, Madrid.

Jiménez, M. P.; Bravo, B. y Puig, B. (2009). "¿Cómo aprende el alumnado a usar y evaluar pruebas?" *Aula de Innovación Educativa*, 186, 10-12.

Jiménez, M. P.; Bugallo, A.; Duschl, R. A. (2000). "Doing the lesson "or sclence": argument in high school genetics". *Science Education*. 84, 757-792.

Jiménez, M. P.; Solano, L. y Marín, N. (1994). "Problemas de terminología en estudios realizados acerca de Io que el alumno sabe sobre ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (2), 235-245.

Jiménez-Aleixandre, M. P. (2008). "Designing argumentation learning environments". En Erduran, S. y Jiménez-Aleixandre, M. P. (Eds.). "Argumentation in science education: perspectives from classroom-based research", 91-115. Springer. Dordrecht.

Jiménez-Aleixandre, M. P. y Erduran, S. (2008). "Argumentation in science education: an overview". En Erduran, S. y Jiménez-Aleixandre, M. P. (Eds.). "Argumentation in science education: perspectives from classroom-based research", 3-27. Springer, Dordrecht.

Johnson-Laird, P. N. (1989). "Mental Models". En: Posner, M. I. (Ed.). "Foundations of Cognitive Science". A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, London.

Johnstone, A. H. (1982). "Macro and microchemistry". *School Science Review,* 64 (227), 377-379.

Johnstone, A. H. (1991). "Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem". *Journal of Computer Assisted Learning*, 7 (2), 75-90.

Johnstone, A. H. (1993). "Development of Chemistry Teaching". *Journal of Chemical Education,* 70, 701-703.

Johnstone, A. H. (2000). "Teaching of chemistry—Logical or psychological?" *Chemistry Education Research and Practice in Europe*, 1, 9-15.

Johnstone, A. H.; MacDonald, J. J.; y Webb, G. (1977a). "Misconceptions in school thermodynamics". *Physics Education,* 12 (4), 248–251.

Johnstone, A. H.; MacDonald, J.; y Webb, G. (1977b). "Chemical equilibrium and its conceptual difficulties". *Education in Chemistry* , 14 (6), 169-171.

Johsua, S. (1986). La desintetización de los modelos físicos: una limitación y una posibilidad de elección. Enseñanza de las Ciencias, 4 (2), 145-152.

Journal of Research in Science Teaching (Vol. 27, Nº. 10, 1990). Varios.

Justi, R. (2006). "La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos". *Enseñanza de las Ciencias*, 24 (2), 173-184.

Justi, R. y Gilbert, J. K. (2002). "Modelling teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers". *International Journal of Science Education*, 24 (4), 369-387.

Kaper, W. H. y Goedhart, M. J. (2002). "'Forms of Energy', an intermediary language on the road to thermodynamics? Part I". *International Journal of Science Education*, 24 (1), 81-95.

Kelly, G. A. (1955). *The Psycology of Personal Constructs.* Norton, New York.

Kelly, G. J. (2008). "Inquiry, activity and epistemic practice". En Duschl, R. A. y Grandy, R. E. (Edits.). "Teaching scientific inquiry. Recommendations for research and implementation", 99-117. Sense Publishers, Rotterdam.

Kelly, G. J. y Takao, A. (2002). "Epistemic levels in argument: an analysis of university oceanography students' use of evidence in writing". *Science Education*, 86 (3), 314-342.

Kelly, G. y Crawford, T. (1996). "Students' interaction with computer representations: analysis of discourse in laboratory groups". *Journal of Research in Science Teaching,* 33 (7), 693-707.

Kemp, H. R. (1984). "The Concept of Energy Without Heat or Work". *Physics Education,* 19 (5), 234-240.

Kemp, H. R. (1985). "Internal work: A thermodynamic treatment". *American Journal Physics,* 52 (10), 1008.

Kempa, R. F. (1986). *Assessment in Science.* Cambridge University Press, Cambridge.

Kermen, I. (2005). "Pourquoi une transformation chimique s'arréte-t-elle ¿Les explications d'éléves de termínale S". Actas Quatriemés rencontres de l'Ardist. Lyon. Disponible en www.inrp.fr/ardist2005/ressources/contributions/43.pdf.

Kermen, I. y Méheut, M. (2009). "Different models used to interpret chemical changes: analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning". *Chemistry Education: Research and Practice*, 10, 24-34.

Kermen, I. y Méheut, M. (2011). "Grade 12 French students' use of a Thermodynamic model for predicting the direction of incomplete chemical changes". *International Journal of Science Education*, 33 (13), 1745-1773. También disponible en http://mc.manuscriptcentral.com/tsed.

Kesidou, S. y Duit, R. (1993). "Students' conceptions of the second law of Thermodynamics - an interpretative study". *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (1), 85-106.

Kind, V. (2002a). "Chemical concepts: closed system chemical reactions". *Education in Chemistry,* 39 (2), 36-40.

Kind, V. (2002b). "Chemical concepts: open system chemical reactions". *Education in Chemistry,* 39 (4), 91-95.

Kind, V. (2004a). "Más allá de las apariencias. Ideas previas de los estudiantes sobre conceptos básicos de química". En Aula XXI Santillana-Facultad de Químic. Disponible en: http://www.chemsoc.org/networks/learnnet/miscon ed.). Méjico: UNAM.

Kind, V. (2004b). "Students' ideas about thermodynamics". Beyond Appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas, 2ª ed., 65-68.

Kozliak, E. I. (2004). "Introduction of Entropy via the Boltzmann Distribution in Undergraduate Physical Chemistry: A Molecular Approach". *Journal of Chemical Education*, 81 (11), 1595-1598.

Kozliak, E. I. (2006). "No "Driving Forces" in General Chemistry". *Journal of Chemical Education*, 83 (5), 702.

Krnel, D.; Watson, R. y Glaser, S. A. (1998). "Survey of research related to the development of the concept of "matter"". *International Journal of Science Education*, 257-289.

Kruger, C. (1990). "Some primary teachers' ideas about energy". *Physics Education,* 25, 86-91.

Kruger, C.; Palacio, D. y Summers, M. (1992). "Survey of english primary teachers' conceptions of energy, force, and materials". *Science Education, 76*, 339-351.

Kuhn, D. (1993). "Science as argument: Implications for teaching and learning scientific thinking". *Science Education,* 77 (3), 319-337.

Kuhn, T. S. (1975). *La estructura de las revoluciones científicas.* Fondo de Cultura Económica, México.

Laburu, C. E. y Niaz, M. (2002). "A lakatosian framework to analyze situations of cognitive conflict and controversy in students' understanding of heat energy and temperature". *Journal of Science Education and Technology,* 11 (3), 211-219.

Lakatos, I. (1978). *Pruebas y refutaciones.* Alianza, Madrid.

Lakin, S. y Weilington, J. (1994). "Who will teachthe 'nature of science? Teachersviews of science and their implications for science education". *International Journal of Science Education,* 16 (2), 175-190.

Lambert, F. L. (1999). "Shuffled Cards, Messy Desks, and Disorderly Dorm Rooms—Examples of Entropy Increase? Nonsense!" *Journal of Chemical Education*, 76 (10), 1385-1387.

Lambert, F. L. (2002a). "Entropy Is Simple, Qualitatively". *Journal of Chemical Education*, 79 (10), 1241-1246.

Lambert, F. L. (2002b). "Disorder—A Cracked Crutch for Supporting Entropy Discussions". *Journal of Chemical Education*, 79 (2), 187-192.

Lambert, F. L. (2006). "A student's approach to the Second Law and Entropy". Disponible en entropysite.com.

Lambert, F. L. (2008a). "Teaching entropy is simple –if you discard disorder". *Conversation About Entropy*, Polytechnic University, Pomona (California). November 8, 2015. También disponible en http://entropysite.oxy.edu.

Lang da Silveira, F. y Moreira, M. A. (1996). "Validación de un test para verificar si el alumno posee concepciones científicas sobre calor, temperatura y energía interna". *Enseñanza de las Ciencias,* 14 (1), 75-86.

Lang da Silveira, F.; Moreira, M. A. y Axt, R. (1991). "Un teste sobre calor, temperatura e energia interna". *Libro de Actas del IX Simpósio Nacional de Ensino de Física*, 418-428. São Carlos.

Latour, B. (1992). *Ciencia en acción.* Labor, Barcelona.

Latour, B. y Woolgar, S. (1995). *La vida en el laboratorio: la construcción de los hechos científicos.* Afianza, Madrid.

Le Maréchal, J. F. y El Bilani, R. (2008). "Teaching and Learning Chemical Thermodynamics in School". *International Journal of Thermodynamics*, 11 (2), 91-99.

Lechner, J. H. (1999). "Visualizing Entropy". *Journal of Chemical Education*, 76 (10), 1382-1385.

Lee, H. y Liu, O. L. (2010). "Assessing learning progressions of energy concepts across middle school grades: The knowledge integration perspective". *Science Education*, 94, 665-688.

Leff, H. S. y Mallinckrodt, A. J. (1993). "Stopping objects with zero external work: Mechanics meets thermodynamics". *American Journal Physics,* 61 (2), 121-127.

Left, H. S. (2012). "Removing the Mystery of Entropy and Thermodynamics (Part I)". *The Physics Teacher*, 50 (1), 28-31.

Left, H. S. (2012). "Removing the Mystery of Entropy and Thermodynamics (Part II)". *The Physics Teacher*, 50, 87-90.

Left, H. S. (2012). "Removing the Mystery of Entropy and Thermodynamics (Part III)". *The Physics Teacher*, 50, 170-172.

Left, H. S. (2012). "Removing the Mystery of Entropy and Thermodynamics (Part IV)". *The Physics Teacher*, 50, 215-217.

Left, H. S. (2012). "Removing the Mystery of Entropy and Thermodynamics (Part V)". *The Physics Teacher*, 50, 274-276.

Lehrman, R. (1973). "Energy is not the ability to do work". *The Physics Teacher*, 11, 15-18.

Leite, L. (1999). "Heat and Temperature: an analysis of how these concepts are dealt with in textbooks". *European Journal of Teacher Education,* 22 (1), 75-88.

Lemke, J. L. (1997). *Aprender a hablar de ciencia: lenguaje, aprendizaje y valores.* Paidós, Barcelona.

Lemke, J. L. (2006). "Investigar para el futuro de la educación científica: nuevas formas de aprender, nuevas formas de vivir". *Enseñanza de las ciencias*, 24 (1), 5-12.

Leonard, H. E. (2006). "Chemical Thermodynamics in the Real World - Letters". *Journal of Chemical Education*, 83 (1), 39.

Levine, I. N. (2002). *Fisicoquímica.* McGraw-Hill, 5ª ed., NY, Madrid.

Levine, I.N. (1995). Fisicoquímica. McGraw-Hill. Madrid.

Lewis, E. L. y Linn, M. C. (1994). "Heat energy and temperature concepts of adolescents, adults, and experts: implications for curricular improvements". *Journal of Research in Science Teaching,* 31, 657-677.

Liberko, C. A. (2005). "Using Science Fiction To Teach Thermodynamics: Vonnegut, Ice-nine, and Global Warming". *Journal of Chemical Education*, 81 (4), 509-512.

Lide, D. R. (Ed.-in-chief). (1999-2000). *Handbook of Chemistry and Physics.* CRC Publishers, 80ª ed., Washington DC.

Lieb, E. H. y Yngvason, J. (1999). "The Physics and Mathematics of the Second Law of Thermodynamics". *Physics Reports,* 310, 1-96.

Lieb, E. H. y Yngvason, J. (2000). "A Fresh Look at Entropy and the Second Law of Thermodynamics", *Physics Today*. 53, 32–37.

Linn, M. C. y Songer, N. B. (1991). "Teaching thermodynamics to middle school students: What are appropriate cognitive demands?" Journal of Research in Science Teaching, 28 (10), 885-918.

Liu, X. y Hinchey, M. (1993). "The validity and reliability of concept mapping as an alternative science assessment". *The Proceedings of the Third Intemational Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Misconceptions Trust. Ithaca.

Liu, X. y McKeough, A. (2005). "Developmental growth in students' concept of energy: analysis of selected items from the timss database". *Journal of Research in Science Teaching,* 42 (5), 493-517.

Liu, X., Ebenezer, J. y Fraser, D. M. (2002). "Structural characteristics of University Engineering students' conceptions of energy". *Journal of Research in Science Teaching,* 39 (5), 423-441.

Llitjós, A.; Estopa, C. y Miró, A. (1994). "Elaboración y utilización de audiovisuales en la enseñanza de la química". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (1), 57-62.

Lloréns, J. (1989). "La función del lenguaje en un enfoque constructivista del aprendizaje de las ciencias". *Enseñanza de las Ciencias, 7* (2), 111-119.

Llorens, J. A. (1991). *Comenzando a aprender química.* Visor, Madrid.

Lloréns, J. A.; Llópis, R. y De Jaime, M. C. (1987). "El uso de la terminología científica en los alumnos que comienzan el estudio de la Química en la Enseñanza Media. Una propuesta metodológica para su análisis". *Enseñanza de las Ciencias,* 5 (1), 33-40.

Lopes, R. (2009). "In the concept of energy: How understanding its history can improve physics teaching". *Science & Education*, 18 (8), 961-983.

López, F. (1990). "Epistemología y Didáctica de las Ciencias. Un análisis de segundo orden". *Enseñanza de las Ciencias,* 8 (1), 65-74.

López-Gay, R. (2010). "La formación inicial del profesorado: una ocasión para la reflexión y para evitar viejos errores". *Actas del XXIV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, . UnIA, Baeza (Jaén).

LoPresto, M. C. (2010). "A simple Statistical Thermodynamics experiment". *The Physics Teacher*, 48 (3), 183-185.

Louisa, M.; Veiga, F. C. S.; Pereira, D. y Maskill, R. (1989). "Teachers' language and pupils' ideas in science lessons: Can teachers avoid reinforcing wrong ideas?" *International Journal of Science Education*, 11 (4), 465-479.

Loverude, M. E.; Kautz, C. H. y Heron, P. R. L. (2002). "Student understanding of the first law of thermodynamics: relating work to the adiabatic compression of an ideal gas". *American Journal of Physics,* 70 (2), 137-148.

Lowe, J. P. (1988). "Entropy: conceptual disorder". *Journal of Chemical Education*, 65 (5), 403-406.

Luna, M. (1989). "El cuaderno de trabajo del alumno en ciencias experimentales". *Investigación en la Escuela,* 8, 81-82.

M.E.C. (04/10/1990). "Ley Orgánica 1/1990, de 3 de octubre, de Ordenación General del Sistema Educativo". *Boletín Oficial del Estado*.

M.E.C. (14/7/2006c). "Real decreto 806/2006, de 30 de junio, por el que se establece el calendario de aplicación de la nueva ordenación del sistema educativo, establecida por la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación". *Boletín Oficial del Estado,* Madrid.

M.E.C. (16 de 01 de 2001). "Real Decreto 3474/2000", de 29 de diciembre, por el que se modifican los R.D. 1700/1991, de 29 de nov., por el que se establece la estructura del Bachillerato, y el R.D. 1178/1992, de 2 oct., por el que se establecen las enseñanzas mínimas del Bachillerato". *Boletín Oficial del Estado,* Madrid.

M.E.C. (2006b). "R. D. 1631/2006, de 29 de diciembre, por el que se establecen las enseñanzas mínimas correspondientes a la Educación Secundaria Obligatoria". *Boletín Oficial del Estado,* Madrid. Publicación en el B.O.E. a fecha de 05/01/2007.

M.E.C. (4/5/2006a). "Ley Orgánica 2/2006", de 3 de mayo, de Educación. *Boletín Oficial del Estado*, Madrid.

M.E.C. (6/11/2007). "Real Decreto 1467/2007, de 2 de noviembre, por el que se establece la estructura del Bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas". *Boletín Oficial del Estado,* Madrid.

Mallinckrodt, A. J. y Leff, H. S. (1992). "All about work". *American Journal Physics,* 60 (4), 356-365.

Marín, N. (1999). "Delimitando el cambio conceptual". *Enseñanza de las Ciencias,* 17 (1), 79-92.

Marín, N. y Benarroch, A. (1994). "A comparative study of Piagetian and constructivist work on conceptions in science". *International Journal of Science Education,* 16 (1), 1-15.

Marín, N. y Jiménez, E. (1992). "Problemas metodológicos en el tratamiento de las concepciones de los alumnos en el contexto de la Filosofía y la Historia de la Ciencia". *Enseñanza de las Ciencias,* 10 (3), 335-339.

Marín, N.; Jiménez, E. y Solano, I. (1999). "Tirando del hilo de la madeja constructivista". *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (3), 479-492.

Markham, K.; Mintzes, J. y Jones, M. G. (1994). "The Concept Map as a Research and Evaluation Tool: Further Evidence of Validity". *Jounal of Research in Science Teaching,* 31 (1), 91-101.

Márquez, C. (2009). "Simposio: promover la competencia científica a través de la argumentación y el pensamiento crítico". *Enseñanza de las Ciencias*, nº extraordinario (VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias), 1277-1278, Barcelona.

Márquez, C. (2010). "Desarrollo de competencias científicas: modelos y evidencias en la lectura, la escritura y la experimentación". *Actas del XXIV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimental*. Baeza.

Márquez, C. y Sardà, A. (2009). "Evaluar la competencia científica". *Aula de Innovación Educativa*, 186, 13-15.

Martí, E. y Pozo, J. I. (2000). "Más allá de las representaciones mentales: la adquisición de los sistemas externos de representación". *Infancia y Aprendizaje,* 90, 11-30.

Martínez, A. y Pérez, B. (1997). "Estudio de propuestas alternativas en la enseñanza de la termodinámica básica". *Enseñanza de las Ciencias,* 15 (3), 287-300.

Martínez, C.; García, S. y Mondelo, M. (1993). "Las ideas de los profesores de ciencias sobre la formación docente". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (1), 26-32.

Martins, I. P. y Cachapuz, A. F. (1990). "How do pupils perceive the concept of energy in chemical situations?" *School Science Review,* 71 (257), 83-85.

Mas, F.; Paniagua, J. C.; Vilaseca, E. y Barbosa, J. (1991). "Vídeos didácticos sobre Física y Química. *Enseñanza de las Ciencias,* 9 (2), 181-185.

Mata, A. y Anta, C. (1985). "Evolución y nuevas tendencias en los trabajos sobre didáctica de las ciencias experimentales. Revisión del año 1984". *Enseñanza de las Ciencias,* 3 (3), 167- 172.

Mata, A. y Anta, C. (1986). Pg115.A140

Matthews, M. (1994). "Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (2), 255-277.

McClelland, G. (1989). "Energy in school science". *Physics Education,* 24, 162-164.

McDermott, L. C. (1993a). "Cómo enseñamos y cómo aprenden los estudiantes. ¿Un desajuste? (Primera parte)". *Revista de Enseñanza de la Física,* 6 (1), 19-32.

McDermott, L. C. (1993b). "Cómo enseñamos y cómo aprenden los estudiantes. ¿Un desajuste? (Segunda parte)". *Revista de Enseñanza de la Física,* 6 (2), 19-28.

Méheut, M. y Psillos, D. (2004). "Teching-learning sequences: aims and tools for science education research". *International Journal of Science Education*, 26 (5), 515-535.

Meheut, M.; Larcher, C. y Chomat, A. (1988). "Modelos de partículas en la iniciación de las ciencias físicas". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (3), 231-238.

Meheut, M.; Saltiel, E. y Tiberghien, A. (1985). "Pupils' (11 - 12 year olds) conceptions of combustion". *European Journal of Science Education,* 7, 83-93.

Melgarejo, A.; Tito, G. y Cappannini, O. (1996). "Propuesta para la enseñanza de la termodinámica del no equilibrio", *Revista de Enseñanza de Física*, 9 (1), 14-22.

Mellado, V. (1996). "Concepciones y prácticas de aula de profesores de ciencias, en formación inicial, de primaria y secundaria". *Enseñanza de las Ciencias,* 14 (3), 398-402.

Mellado, V. (1998). "El estudio de aula en la formación continuada del profesorado de ciencias". *Alambique,* 15, 39-46.

Mellado, V. (2000). "¿Es adecuada la formación científica del profesorado de ciencias de secundaria para sus necesidades profesionales?" *Alambique* 15, 39-46.

Mellado, V. y Carracedo, D. (1993). "Contribuciones de la filosofía de la ciencia a la didáctica de las ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (3), 324-330. [ó 331 – 339]

Mellado, V. y González, T. (2000). "La formación inicial del profesorado de ciencias". En Perales Palacios, F. J. y Cañal de León, P. (Edits.). "Didáctica de las Ciencias Experímentales". Marfil, Alcoy.

Meltzer, D. E. (2004). "Investigation of students' reasoning regarding heat, work, and the first law of thermodynamics in an introductory calculus-based general physics course". *American Journal of Physics,* 72, 1432-1440.

Membiela, P.; Suárez, M. y Nogueiras, E. (1994). "Evaluación del proyecto curricular "naturaleza en la ciudad"". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (1), 22-29.

Méndez Coca, D. (2012). "Efecto de las TIC y el aprendizaje cooperativo en el aprendizaje de la termodinámica". *Actas del XXV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales,* 491-498. Ápice, Santiago de Compostela.

Mendoza Rodríguez, J. (2001) (coord.). *Experiencias de laboratorio en Química. Orientacións didácticas para Bacharelato.* Servicio de Publicacións e Intercambio Científico da Universidade de Santiago de Compostela, Colección Investigación Educativa, 16, Santiago de Compostela.

Michinel, J. L. y D'Alessandro, A. (1994). "El concepto de energía en los libros de texto: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (3), 369-380.

Miguens, M. y Garret, R. M. (1991). "Prácticas en la enseñanza de las ciencias. Problemas y posibilidades". *Enseñanza de las Ciencias,* 9 (3), 229-236.

Millar, R. (2005). "Teaching about energy". *Research Paper 2005/11.* Department of Educational Studies, University of York.

Millar, R. y Driver, R. (1987). "Beyond Processes". *Studies in Science Education.* 14, 33-62.

Millar, Robin y Osborne, Jonathan. (1998). *Beyond 2000: Science education for the future.* School of Education, King's College, Ministry of Education and Science in Sweden, London. Disponible en la web: http://www.kcl.ac.uk/depsta/education/be2000/be2000.pdf.

Mills, K. V. y Guilmette, L. W. (2007). "Thermochemical Analysis of Neutralization Reactions: An Introductory Discovery Experiment". *Journal of Chemical Education*, 84 (2), 326-328.

Mills, P. A.; Sweeney, W. V. y Cieniewicz, W. (2001). "Experiencing and visualizing the First Law of Thermodynamics: an in-class workshop". *Journal of Chemical Education*, 78 (10), 1360-1361.

Minsky, M. (1986). *La sociedad de la mente: la inteligencia humana a la luz de la inteligencia artificial.* Galápago, Buenos Aires.

Mirone, P. y Benedetti, L. (2001). "Apprendimento significativo della termodinamica. Un tentativo de valutazione". *La Chimica nella Scuola*, 23 (5), 153-156.

Missoni, M. (1985). "Problemi relativi all' insegnamento/apprendimento della termodinámica". *Enseñanza de las Ciencias, nº. extraordinario. I Congreso Internacional sobre Investigación en la Didáctica de las Ciencias y de las Matemáticas,* 3, 53.

Mitchell, A. C. y Kellington, S. H. (1982). "Learning difficulties associated with the particulate theory of mater in the Scottish Integrated Science Course". *European Journal of Science Education,* 4 (4), 429-440.

Moliner, M. (2007). *Diccionario de uso del español*. Editorial Gredos, 3ª Ed., Madrid.

Moore, J. y Schwenz, R. W. (1992). "The problem with P. Chem". *Journal of Chemical Education,* 69 (12), 1001-1002.

Moreira, M. A. y Buchweitz, B. (1987). *Mapas conceptuais.* Moraes, Sáo Paulo.

Moreira, M. A. y Novak, J. (1988). "Investigación en la enseñanza de las ciencias en la Universidad de Cornell: esquemas teóricos, cuestiones centrales y abordes metodológicos". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (1), 3-18.

Moreno Alcalde, A. (2008). "Competencias educativas y objetivos como capacidades". *Escuela*, 3783, 35.

Moreno, A. (2006). "Atomismo vs. energetismo: controversia científica a finales del siglo XIX". *Enseñanza de las Ciencias*, 24 (3), 411-429.

Moreno, L. y Waldegg, G. (1998). "La epistemología constructivista y la didáctica de las ciencias: ¿coincidencia o complementariedad?" *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (3), 421-429.

Mortimer, E. F. (1995). "Conceptual change or conceptual profile change?" *Science & Education*, 4 (3), 262-287.

Mortimer, E. F. y Scott, P. H. (2003). *Meaning Making in Secondary Science Classrooms*. Open University Press, Buckingham.

Mujtaba, T. y Reiss, M. J. (2013). "Inequality in Experiences of Physics Education: Secondary School Girls' and Boys' Perceptions of their Physics Education and Intentions to Continue with Physics After the Age of 16". *International Journal of Science Education*, 35 (11), 1824-1845.

Mullis, I. V. S.; Martin, M. O.; Ruddock, G. J.; O'Sullivan, C. Y.; Arora, A. y Erberber, C. (2007). TIMSS 2007 Assessment Frameworks. United States:TIMSS & PIRLS International Study Center, Lynch School of Eduction, Boston College. También disponible en http://timss.bc.edu/TIMSS2007/PDF/T07_AF.pdf.

Nakhleh, M. B. (1992). "Why some students don't learn chemistry. Chemical misconceptions". *Journal of Chemical Education,* 69 (3), 191-196.

Nakhleh, M. y Mitchell, R. (1993). "Concept learning versus Problem solving: there is a difference". *Journal of Chemical Education,* 70 (3), 190-192.

National Research Council (1996). *National Science Education Standards.* National Academy Press, Washington DC.

National Research Council (2000). *How people learn: Brain, mind, experience, and school (expanded edition)*. National Academy Press, Washington, DC.

National Research Council. (2001). *Knowing what students know: The science and design of educational assessment*. National Academy Press, Washington, DC.

National Research Council. (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades k-8*. National Academies Press, Washington, DC.

Neumann, K.; Viering, T.; Boone,W. J. y Fischer, H. E. (2013). "Towards a learning progression of energy". *Journal of Research in Science Teaching*, 50 (2), 162-188.

Newell, A.; Rosenbloom, P. S. y Laird, J. E. (1989). "Symbolic Architectures for Cognition". En: Posner, M. I. (Ed.). "Foundations of Cognitive Science". A Bradford Book, The MIT Press. Cambridge, London.

Niaz, M. (1994). "Más allá del positivismo: una interpretación lakatosiana de la enseñanza de las ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (1), 97-100.

Niaz, M. (2000). "A framework to understand students' differentiation between heat energy and temperature and its educational implications". *Interchange,* 31 (1), 1-20.

Niaz, M. (2006). "Can the study of Thermochemistry facilitate students' differentiation between heat energy and temperature?" *Journal of Science Education and Technology,* 15 (3-4), 269-276.

Nicholls, G. y Ogborn, J. (1993). "Dimensions of children's conceptions of energy". *International Journal of Science Education,* 15, 73-81.

Nicoll, G. (2001). "A report of undergraduates' bonding misconceptions". *International Journal of Science Education,* 23 (7), 707-730.

Nieda, J.; Cañas, A. y Martín, M. J. (2012). "¿Cómo se colabora desde la competencia científica al desarrollo de las demás?" *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 70, 46-53.

Nordine, J.; Krajcik, J. y Fortus, D. (2010). "Transforming energy instruction in middle school to support integrating understanding and future learning". *Science Education*, 95 (4), 670-699.

Norman, D. A. (1985). *El aprendizaje y la memoria.* Alianza Psicología, Madrid.

Norman, D. A. (1987). *Perspectives in cognitive science*. Erlbaum, New Jersey.

Norris, S. P. y Phillips, L. M. (1994). "Interpreting pragmatic meaning when reading popular reports of science". *Journal of Research in Science Teaching,* 31 (9), 947-967.

Novak, D. J. (1998). *Conocimiento y aprendizaje*. Alianza, Madrid.

Novak, I. (2003). "The microscopic statement of the second law of Thermodynamics". *Journal of Chemical Education,* 80 (12), 1429-1431.

Novak, I. (2005). "Microscopic Description of Le Châtelier's Principle". *Journal of Chemical Education*, 82 (8), 1190-1191.

Novak, J. (2002). "Meaningful learning: The essential factor for conceptual change in limited or inappropriate propositional hierarchies leading to empowerment of learners". *Science Education,* 86 (4), 548-571.

Novak, J. D. (1988). "Constructivismo humano: un consenso emergente". *Enseñanza de las Ciencias,* 6 (3), 213-223.

Novak, J. D. (1991). "Ayudar a los alumnos a aprender a aprender. La opinión de un profesor-investigador", *Enseñanza de las Ciencias*, 9 (3), 219-222

Novak, J. D. y Gowin, D. B. (1988). *Aprendiendo a aprender.* Martínez Roca, Barcelona.

Novick, S. y Nussbaum, J. (1978). "Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter: an interview study". *Science Education,* 62 (3), 273-281.

Novick, S. y Nussbaum, J. (1981). "Pupils' understanding of the particulate nature of matter: a cross-age study". *Science Education,* 65 (2), 187-196.

Nuremberg, S. y Pickering, M. (1987). "Concept learning versus problem solving: Is there a difference?" *Journal of Chemical Education,* 64 (6), 508-510.

Nussbaum, J. (1989a). "La constitución de la materia como conjunto de partículas en la fase gaseosa". En Driver, R.; Guesne, E. y Tiberguien, A. "Ideas Científicas en la Infancia y la Adolescencia". Morata, MEC, Madrid.

Nussbaum, J. (1989b). "Classroom conceptual change: philosophical perspectives". *International Journal in Science Education*, 11, 530-540.

OECD. (2000a). *Measuring student knowledge and skills: The PISA 2000 assessment of reading, mathematical and scientific literacy*. París.

OCDE (2000b). *Resultados PISA 2000: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (2002). Conocimientos y aptitudes para la vida. Primeros resultados del PISA 2000 de la OCDE.* Santillana-MEC, Madrid.

OCDE. (2003a). *Marcos teóricos de PISA 2003. Conocimientos y destrezas en Matemáticas, Lectura, ciencias y solución de problemas.* Santillana Educación S. L., Edición española (2004), Madrid.

OCDE (2003b). *Resultados PISA 2003; el informe español está en OCDE (2004). Aprender para el mundo de mañana*. Santillana, Madrid.

OCDE. (2004). *Learning for Tomorrow's World First Results from PISA 2003*. OCDE, París.

OCDE. (2005). *Teachers matter. Attracting, Developing and retaining effective teachers education and training policy.* OECD Publishing, París.

OCDE (2007). *PISA 2006. Science competencies for tomorrow's world*. OCDE, París.

OCDE. (2009a). "Equally prepared for life? How 15-year-old boys and girls perform in school". Disponible en http://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/42843625.pdf.

OCDE (2009b). *Marco teórico PISA 2009. PISA 2009 assessment framework: key competencies in reading, mathematics and science*. OCDE, París.

OCDE. (2006a). *PISA 2006. Marco de la evaluación. Conocimientos y habilidades en Ciencias, Matemáticas y Lectura.* Santillana, M.E.C, Madrid.

OCDE. (2006b). *Resultados PISA 2006; MEC-IE, 2007: PISA 2006: programa para la evaluación internacional de alumnos de la OCDE. Informe español*. MEC, Madrid.

OECD (2006c). *Assessing Scientific, Reading and Mathematical Literacy: A Framework for PISA 2006*. OECD, París. También disponible en http://www.pisa.oecd.org/. También disponible en OCDE (2006). *Evaluación de la Competencia Científica, Lectora y Matemática: Un marco teórico para PISA 2006.* INECSE, MEC, Madrid. También disponible en http://www.ince.mec.es/index.htm.

OCDE. (2006d). "Evolution of Student Interest in Science and Technology Studies. May 4, 2006". Disponible en http://www.oecd.org/science/sci-tech/36645825.pdf.

OCDE. (2007). "El programa PISA de la OCDE. Qué es y para qué sirve". Disponible en www.oecd.org.

OCDE. (2010). *PISA 2009 Results: What Students Know and Can Do – Student Performance in Reading, Mathematics and Science.* En MEC. "PISA 2009. Programa para la Evaluación Internacional de los Alumnos OCDE. Informe español". MEC, Madrid.

OCDE (Hersh Salganik, L.; Simone Rychen, D.; Moser, U. y Konstant, J. W.) (1999a). *Definición y selección de competencias. Proyectos sobre Competencias en el Contexto de la OCDE. Análisis de base teórica y conceptual*. OCDE, Neuchâtel.

Ochs, R. (1996). "Thermodynamics and spontaneity". *Journal of Chemical Education,* 73 (10), 952-954.

Odetti, H.; Falicoff, C.; Contini, L. y Humpola, P. (2001). "Aprendizaje universitario; análisis sobre el tema calor y temperatura en los cambios de estado". *Educación Química,* 12, 27-33.

Ogborn, J. (1974). "For the Teaching of Thermodynamics in School". *Education in Chemistry*, 11 (1), 11-16.

Ogborn, J. (1976). "The Second Law of Thermodynamics: A Teaching Problem and an Opportunity". *School Science Review*, 57 (201), 654-672.

Ogborn, J. (1986). "Energy and fuel –the meaning of 'the go of things'". En Driver, R.; y Millar, R. "Energy matters". Universidad de Leeds, Leeds.

Ogborn, J. (1990). "Energy, change, difference and danger". *SSR,* 72 (259), 81-85.

Ogborn, J. (1997). "Constructivist metaphors of learning science". *Science & Education*, 6, 121-133.

Oliva, J. (2005). "Sobre el estado actual de la Revista Enseñanza de las Ciencias y algunas propuestas de futuro". *Enseñanza de las Ciencias* , 23 (1), 123-132.

Oliva, J. M. (1999). "Ideas para la discusión sobre las concepciones del cambio conceptual". *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (1), 115-117.

Ollerenshaw, C. H. y Ritchie, R. (1997). *Primary Science. Making it work.* David Fulton Publishers, Londres.

Oñorbe, A. (2008). "Las pruebas de evaluación en Ciencias en el proyecto PISA". *Alambique*, 57, 41-52.

Organisation for Economic Co-operation and Development (2009z). *Top of the class – high performers in science in PISA 2006*. OCDE, París.

Osborne, J. F. (1996). "Beyond constructivism". *Science Education,* 80 (1), 53-82.

Osborne, J. F.; Simon, S. y Collins, S. (2003). "Attitudes towards science: A review of the literature and its implications". *International Journal of Science Education*, 25 (9), 1049-1079.

Osborne, J.; Erduran, S. y Simon, S. (2004). "Enhancing the quality of argumentation in school science". *Journal of Research in Science Teaching*, 41 (10), 994-1020.

Osborne, R. y Freyberg, P. (1991). *El aprendizaje de las Ciencias. Implicaciones de la Ciencia de los alumnos.* Narcea, Madrid.

Osborne, R. y Wittrock, M. C. (1983). "Leaming science: a generative process". *Science Education,* 67 (4), 489-508.

Osborne. R. (1991). "Construir a partir de las ideas intuitivas de los alumnos". En: Osbome, R. y Freyber, P. "El aprendizaje de las Ciencias. Implicaciones de la Ciencia de los alumnos". Narcea, Madrid.

Otero, J. (1989). "La producción y la comprensión de la ciencia: la elaboración en el aprendizaje de la ciencia escolar". *Enseñanza de las Ciencias,* 7 (3), 223-228.

Otero, J. (1990). "Variables cognitivas y metacognitivas en la comprensión de textos científicos: el papel de los esquemas y el control de la propia comprensión". *Enseñanza de las Ciencias,* 8 (1), 17-22.

Otero, J. y Brincones, I. (1987). "El aprendizaje significativo de la segunda ley de la termodinámica". *Infancia y Aprendizaje,* 38, 89-107.

Oztas, F. (2009). "Basic laws of thermodynamics and the influence of vitalistic conception on learning of the high school students about matter cycle and energy flow". *Journal of Applied Science*, 9, 944-949.

Paik, S. H.; Cho, B. K. y Go, Y. M. (2007). "Korean 4- to 11-year-old student conceptions of heat and temperature". *Journal of Research in Science Teaching,* 44 (2), 284-302.

Papadouris, N. y Constantinou, C. P. (2010). "A philosophically informed teaching proposal on the topic of energy for students aged 11-14". *Science & Education*, 20, 961-979.

Pastor, J. M. (2003). "El nuevo currículo de Física en el Bachillerato". *Alambique*, 36, 19-24.

Peckham, G. D. y McNaught, I. J. (1993). "Heat and Work Are Not "Forms of Energy"". *Journal of Chemical Education*, 62 (7), 103-104.

Pedrinaci, E. (2012). "La noción de competencia científica proporciona criterios para seleccionar, enseñar y evaluar los conocimientos básicos". En Pedrinaci, E. (Ed.). "11 ideas clave. El desarrollo de la competencia científica", 39-58. Graó, Barcelona.

Perales Palacios, F. J. y Cañal de León, P. (2000). *Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Marfil, Alcoy.

Perales, F. J. (1993). "La resolución de problemas: una revisión estructurada". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (2), 170-178.

Perales, F. J. (2000). *Resolución de problemas*. Síntesis, Madrid.

Pereira García, I. y Domínguez Castiñeiras, J. (2011). "La termodinámica de las reacciones químicas". En: Rocha, A.; García de Cajén, S. y Domínguez Castiñeiras, J. (Comp.). "Materiales didácticos para la enseñanza de las Ciencias de la Naturaleza en Secundaria y Bachillerato". Servicio de Publicaciones de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil (Argentina).

Pereira García, I. y Domínguez Castiñeiras, J. M. (2008a). "Problemática de aprendizaje de la Termodinámica Química". *Actas del XXIII Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales,* 732-751. Editorial Universidad de Almería, Almería.

Pereira García, I. y Domínguez Castiñeiras, J. M. (2008b). "Protocolo para investigar a implementación dunha secuencia de ensinanza na aula: Temodinámica Química". *Libro-Guía del XXI Congreso de ENCIGA,* 59-61. ENCIGA. También disponible en http://www.enciga.org/enciga_ant/congreso/2008/index.htm.

Pereira García, I. y Domínguez Castiñeiras, J. M. (2009). "Una propuesta didáctica para la enseñanza de la Termoquímica en 2º de Bachillerato". *Enseñanza de las Ciencias,* nº extraordinario 2009, 2597-2604. Barcelona.

Pereira García, I. y Domínguez Castiñeiras, J. M. (2010). "Evaluación de una propuesta didáctica para la enseñanza de la Termoquímica en Bachillerato". *Actas del XXIV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*; 442-459. Baeza (Jaén).

Pereira García, I. y Domínguez Castiñeiras, J. M. (2012). "Desarrollo de competencias científicas durante la implementación de una propuesta didáctica sobre Termoquímica en Bachillerato". *Actas del XXV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 525-533. Santiago de Compostela.

Pérez Murugó, M. y Marbà Tallada, A. (2012). "Tratamiento del concepto de energía en los libros de texto de biología". *Actas del XXV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 543-550. Ápice, Santiago de Compostela.

Pérez, M. C. et al. (1995). "La energía como núcleo en el diseño curricular de la física". *Enseñanza de las Ciencias,* 13 (1), 55-65.

Pérez-Landazábal, M. C. y Varela-Nieto, M. P. (2006). "Una propuesta para desarrollar en el alumno de secundaria una visión unificada de la física a partir de la energía". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias,* 3 (2), 237-250.

Pessoa, A. M. y Castro, R. S. (1992). "La historia de la ciencia como herramienta para la enseñanza de la física en secundaria: un ejemplo en calor y temperatura". *Enseñanza de las ciencias,* 10 (3), 289-294.

Peterson, R. F.; Treagust, D. F. y Garnett, P. (1989). "Development and application of a diagnostic instrument to evaluate grade 11 and 12 students concepts of covalent bonding and structure following a course of instruction". *Journal of Research in Science Teaching,* 26 (4), 301-314.

Pétursson, S. (2003). "Three forms of energy". *Journal of Chemical Education,* 80 (7), 776-778.

Pfundt, H. y Duit, R. (2000). *Bibliography: Students' Alternative Frameworks and Science Education*. Leibniz Institute for Science Education (IPN), Universidad de Kiel, 5ª ed., Kiel.

Phillips, D. C. (1998). "Coming to Grips With Radical Social Constructivisms". En Matthews (edc.). "Constructivism in Science Education. A Philosophical Examination", 139-158. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (The Netherlands).

Piaget, J. (1978). *La equilibración de las estructuras cognitivas.* Siglo XXI, Madrid.

Pinker, S. (1989). "Languaje Acquisition". En: Posner, M. I. (Ed.). "Foundations of Cognitive Science". A Bradford Book, The MlT Press, Cambridge, London.

Pintó Casulleras, R. (1991). *Tesis Doctoral. Algunos aspectos implícitos en la primera y segunda ley de la termodinámica: una aportación al estudio de las dificultades de su aprendizaje*. Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona.

Pintó, R. (2004). "¿Qué modelo de energía deseamos que construyan nuestros estudiantes de secundaria?" *Alambique*, 42, 41-54.

Pintó, R.; Aliberas, J. y Gómez, R. (1996). "Tres enfoques sobre la investigación en concepciones alternativas". *Enseñanza de las Ciencias,* 14 (2), 221-232.

Pollatsek, A. y Rayner, K. (1989). "Reading". En: Posner, M. I. (Ed.). "Foundations of Cognitive Science". A Bradford Book, The MlT Press, Cambridge, London.

Pontecorvo, C. y Girardet, H. (1993). "Arguing and reasoning in Understanding Historical Topics". *Cognition and Instruction,* 11 (3 y 4), 365-395.

Pontecorvo, C. y Orsolini, M. (1992). "Analizando los discursos de las prácticas alfabetizadoras desde la perspectiva de la teoría de la actividad". *Infancia y Aprendizaje,* 58, ime 125-141.

Pontes Pedrajas, A. (2000). "Aprendizaje reflexivo y enseñanza de la energía: una propuesta metodológica". *Alambique*, 25, 80-94.

Pontes, A. (1999). "Utilización del ordenador en la enseñanza de las ciencias". *Alambique*, 19, 53-64.

Popper, K. (1983). *Conjeturas y refutaciones. El desarrollo del conocimiento científico.* Paidós, Barcelona.

Porlán, R. (1987). "El diario del profesor". *Investigación en la Escuela,* 2, 77-78.

Porlán, R. (1987). "El maestro como investigador en el aula. Investigar para conocer, conocer para enseñar". *Investigación en la Escuela.* 1. 63-69.

Porlán, R. (1998). "Pasado, presente y futuro de la Didáctica de las Ciencias", *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (1), 175-185.

Porlán, R.; Rivero, A. y Martin, R. (2000). "El conocimiento del profesorado sobre ciencia, su enseñanza y aprendizaje". En Perales Palacios, F. J. y Cañal de León, P. (Edits.). "Didáctica de las Ciencias Experimental". Marfil, Alcoy.

Posada, J. M. (2000). "El estudio didáctico de las ideas previas". En Perales Palacios, F. J. y Cañal de León, P. (Edits.). "Didáctica de las ciencias experimentales". Marfil, Alcoy.

Posner, G. J.; Strike, K. A.; Hewson, P. W. y Gertzog, W. A. (1982). "Accomodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change", *Science Education,* 62 (2), 211-227.

Posner, M. I. (Ed.) (1989). *Foundations of Cognitive Science.* A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, London.

Pozo, J. I. (1987). *Aprendizaje de la Ciencia y pensamiento causal.* Visor Aprendizaje, Madrid.

Pozo, J. I. (1989). *Teorías cognitivas del aprendizaje.* Morata, Madrid.

Pozo, J. I. (1992). "El aprendizaje y la enseñanza de hechos y conceptos". En Coll, C.; Palacios, J. y Marchesi, A. (Edits.) "Desarrollo Psicológico y Educación II. Psicología de la Educación". Alianza, Madrid.

Pozo, J. I. (1996). "Las ideas del alumnado sobre la ciencia: de dónde vienen, a dónde van... y mientras tanto qué hacemos con ellas". *Alambique,* 7, 18-26.

Pozo, J. I. (1996). *Aprendices y maestros.* Alianza, Psicología Minor, Madrid.

Pozo, J. I. (1996b). "No es oro todo lo que reluce, ni se construye (igual) todo lo que se aprende. Contra el reduccionismo constructivista". *Anuario de Psicología,* 69 (2), 127-139.

Pozo, J. I. (1999a). "Sobre las relaciones entre el conocimiento cotidiano de los alumnos y el conocimiento científico: del cambio conceptual a la integración jerárquica". *Enseñanza de las Ciencias,* número extra, junio, 15-29.

Pozo, J. I. y Gómez Crespo, M. A. (1998). *Aprender y enseñar ciencia. Desde el conocimiento cotidiano al conocimiento científico.* Morata, Madrid.

Pozo, J. I.; Postigo, Y. y Gómez, M. A. (1995). "Aprendizaje de estrategias para la solución de problemas en ciencias". Alambique, 5, 16-26.

Pozo, J. I.; Del Puy Pérez, M.; Sanz, A. y Limón, M. (1992). "Las ideas de los alumnos sobre la ciencia como teorías implícitas". *Infancia y Aprendizaje*, 57 (3), 3-22.

Prado Orbán, X. (2010). Tesis Doctoral. *Deseño e implementación dunha proposta de ensinanza da relatividade especial en primeiro de Bacharelato, baseada na formulación xeométrica de Minkowski*. Servicio de Publicaciones de la USC, Santiago de Compostela.

Price, G. (1998). "Thermodynamics of Chemical Processes". Oxford Chemistry Primers, Oxford University Press, Oxford.

Pro, A. (1990). "La didáctica de las ciencias experimentales en el contexto de la reforma". *Publicaciones* 18, 65-86.

Pro, A. (1998). "¿Se pueden enseñar contenidos procedimentales en las clases de ciencias?" *Enseñanza de las Ciencias,* 16 (1), 21-41.

Pro, A. (2003). "La construcción del conocimiento científico y los contenidos de ciencias". En Jiménez, M. P. (Ed.). "Enseñar ciencias". Graó, Barcelona.

Pro, A. (2007). "De la enseñanza de los conocimientos a la enseñanza de las competencias". *Alambique,* 53, 10-21.

Pro, A. (2008). Ciencias para el mundo Contemporáneo: una posibilidad de modificar la enseñanza de las ciencias. *Alambique*, 56, 87-97.

Pro, A. y Saura, O. (2000). "¿Qué contenidos conceptuales utilizan los profesores cuando planifican unidades didácticas en la educación secundaria?" *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 24, 87-98.

Pro, A.; Hernández, L. y Saura, O. (1997). "La compleja tarea de enseñar la ciencia escolar: dificultades para incorporar la actualidad científica al aula". *Publicaciones*, 25, 26, 27, 161-183.

Pro. A. (1995). "Reflexiones para la selección de contenidos procedimentales en ciencias". *Alambique,* 2 (6), 77-87.

Pro. A. (1997). "¿Cómo pueden secuenciarse contenidos procedimentales?"*Alambique,* 14, 49-59.

Pushkin, D. B. (1997). "Scientific Terminology and Context: How Broad or Narrow Are Our Meanings?" *Journal of Research in Science Teaching*, 34 (6), 655-660.

Quantities, units, and symbol in Physical Chemistry (1993)

Quílez, J. (2009). "Análisis de los errores que presentan los libros de texto universitarios de química general al tratar la energía libre de Gibbs". *Enseñanza de las Ciencias,* 27 (3), 317-330.

Quílez, J. y Solaz, J. J. (1994). "Análisis termodinámico de las insuficiencias del principio de Le Châtelier en el desplazamiento del equilibrio químico". *Afinidad*, 51 (454), 435-438.

RAE. (2008). Real Academia Española, www.rae.es, consultado en diciembre de 2008.

Ramsden, J. M. (1998). "Mission impossible?: Can anything be done about attitudes to science?" *International Journal of Science Education,* 20 (2), 125-137.

Raviolo, A. (1996). "Los núcleos conceptuales y una secuencia constructivista en la enseñanza de la energía". *Revista de Enseñanza de la Física,* 9 (2), 33-45.

Raviolo, A. y Andrade, J. (1994). "Curso de ingreso en química a la universidad: un espacio de revisión y aprendizaje conceptual". *Enseñanza de las Ciencias,* 12 (3), 361-368.

Raviolo, A. y Martínez, A. M. (2003). "Una revisión sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en relación con el equilibrio químico. Clasificación y síntesis de sugerencias didácticas". *Educación Química,* 14 (3), 60-66.

Read, J. R. y Kable, S. H. (2007). "Educational analysis of the first year chemistry experiment 'Thermodynamics Think-In': an ACELL experiment". *Chemistry Education Research and Practice*, 8 (2), 255-273.

Reif, F. (1999). "Thermal Physics in the Introductory Physics Course: Why and How to Teach It from a Unified Atomic Perspective". *American Journal of Physics*, 67 (12), 1051-1062.

Reigosa, C. y Jiménez, M. P. (2000). "La cultura científica en la resolución de problemas en el laboratorio". *Enseñanza de las Ciencias,* 18 (2). 275-284.

Resnick, L. B. (1983). "Mathematics and Science Learning: a new conception". Science, 220, 477-478.

Ribeiro Amaral, E. y Mortimer, E. F. (2004). "Un perfil conceptual para entropía y espontaneidad: una caracterización de las formas de pensar y hablar en el aula de Química". *Educación Química*, 15 (3), 218-233.

Ribeiro, G. T. C. (1992). "Entropy and the second principle of Thermodynamics - Fourth year undergraduates' ideas". *Research in Assessment,* IX, 23-36. Royal Society of Chemistry, London.

Ribeiro, Pereira y Maskill., (1990) En pg 180 y 186-7 190-3-4.

Richmond, G. y Striley, J. (1996). "Making meaning in classrooms: Social processes in small group discourse and scientific knowledge building". *Journal of Research in Science Teaching,* 33 (8), 839-858.

Rocard, M.; Csermely, P.; Jorde, D.; Lenzen, D.; Walwerg-Henriksson, H. y Hemmo, V. (2007). *Science Education Now: A Renewed Pedagogy for the Future of Europe.* European Commission, Community Research. Disponible un resumen en *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 55, 104-117. También disponible en http://ec.europa.eu/research/sciencesociety/document_library/pdf_06/report-rocard-on-science-education_en.pdf.

Rocard, M.; Csermely, P.; Jorde, D.; Lenzen, D.; Walwerg-Henriksson, H. y Hemmo, V. (2008). "Enseñanza de las ciencias ahora: una nueva pedagogía para el futuro de Europa", *Alambique,* 55, 104-120.

Rocha, A. L. (2008). Tesis Doctoral. *Diseño de una propuesta didáctica y su contribución a la enseñanza y aprendizaje del Equilibrio Químico, para alumnos ingresantes a la Universidad*. Servicio de Publicaciones de la USC, Santiago de Compostela.

Rocha, A.; García-Rodeja, E.; Scandroli, N. y Domínguez, C. J. (2000). "Propuesta para la enseñanza del equilibrio químico". *Educación Química,* 11 (3), 343-352.

Rodrigo, M. J. y Cubero, R. (2000). "Constructivismo y enseñanza de las ciencias". En Perales Palacios, F. J. y Cañal de León, P. (Edits.). "Didáctica de las Ciencias Experimentales". Marfil, Alcoy.

Rodríguez Renuncio, J. A.; Ruiz Sánchez, J. J. y Urieta Navarro, J. S. (2000). "Termodinámica Química". Editorial Síntesis, 2ª ed. corregida, Madrid.

Rodríguez, J. y Brainard, A. J. (1989). "An Improved Mnemonic Diagram for Thermodynamic Relationships". *Journal of Chemical Education*, 66 (6), 495-496.

Rodríguez, L. M.; Gutiérrez, F. A. y Molledo, J. (1992). "Una propuesta integral de evaluación en ciencias". *Enseñanza de las Ciencias,* 10 (3), 254-267.

Roldán-Ruíz, G.; Melo, L.; Mellado, V. y Cañada, F. (2012). "Estudio Longitudinal de las Ideas Previas sobre la Energía en Alumnos de Bachillerato de Ciencias". *Actas del XXV Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 1291-1298. Ápice, Santiago de Compostela.

Romer, R. H. (2001). "Heat is not a noun". *American Journal of Physics*, 69 (2), 107-109.

Ross, K. (1993). "There is no energy in food and fuels - but they do have fuel value". *School Science Review*, 75 (221), 39-47.

Ross, K. A. (1988). "Matter scatter and energy anarchy. The second law of Thermodynamics is simply common experience". *School Science Review*, 69 (248), 438-445.

Roth, W. M. (1995). *Authentic School Science. Knowing and learning in opend-inquiry science laboratories.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Roth, W. M. y Roychoudhury, A. (1993). "The Concept Map as a Tool for Collaborative Construction of Knowledge: A Microanalysis of High School Physics Students". *Journal of Research in Science Teaching,* 30 (5), 503-534.

Rozier, S. y Viennot, L. (1991). "Students' reasoning in thermodynamics". *International Journal of Science Education,* 13 (2), 159-170.

Rumelhart, D. E. (1983). *Introducción al proceso de información*. Ed. Limusa, 1ª ed., Méjico D. F.

Rumelhart, D. E. (1989). "The architecture of mind: a connectionist approach". En Posner, I. (Ed.). *Foundations of Cognitive Science.* The MIT Press, Cambridge

Rumelhart, D. E. y Ortony, A. (1982). "La representación del conocimiento en la memoria". *Infancia y Aprendizaje* 19 (20), 115-118.

Russell, T. L. (1983). "Analizing arguments in science classroom discourse: can teachers' questions distort scientific authority? Journal of Research in Science Teaching, 20 (1), 27-45.

Rychen, A. C. y Salganik, A. C. (2003). *Las competencias clave para el bienestar personal, social y económico.* Aljibe, Archidona (Málaga).

Sadler, T. D. (2004). "Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research". *Journal of Research in Science Teaching,* 41 (5), 513-536.

Sadler, T. D. y Zeidler, D. L. (2009). "Scientific literacy, PISA, and socioscientific discourse: Assessment for progressive aims of science education". *Journal of Research in Science Teaching*, 46 (8), 909-921.

Sakschewski, M.; Eggert, S.; Schneider, S. y Bögeholz, S. (2014). "Students' Socioscientific Reasoning and Decision-making on Energy-related Issues—Development of a measurement instrument", *International Journal of Science Education*, 36 (14), 2291-2313.

Salinas, J.; Cudmani, L. D. y Pesa, M. (1996). "Modos espontáneos de razonar: un análisis de su incidencia sobre el aprendizaje del conocimiento físico a nivel universitario básico". *Enseñanza de las Ciencias,* 14 (2), 209-220.

Saltiel, E. (1997). "Le principe de conservation de l'énergie et le thèorème de l'énergie mécanique en classe de première". *Bulletin de l'Union des Physiciens,* 91 (794), 957-972.

Saltiel, E. y Viennot, L. (1985). "¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?" *Enseñanza de las Ciencias,* 3 (2), 137-144.

Sánchez Mambrilla, A. (1983a). "¿Se puede enseñar el concepto de energía?" *Enseñanza de las ciencias*, 1 (1), 65-65.

Sánchez Mambrilla, A. (1983b). "El concepto de energía en el Bachillerato". *Enseñanza de las ciencias*, 1 (2), 139-141.

Sánchez Piso, J. (2006). Tesis Doctoral. *Enseñanza de la Cinética Química en Secundaria*. Servicio de Publicaciones de la USC, Santiago de Compostela.

Sánchez Piso, J.; Domínguez Castiñeiras, J. M. y García-Rodeja Fernández, E. (2002). "Revisión de la investigación sobre la enseñanza de la cinética química". *ADAXE. Revista de Estudios e Experiencias Educativas,* 18, 171-190.

Sánchez, G. (1997). *Tesis Doctoral. Diseño, desarrollo y evaluación de un programa de formación sobre la planificación de unidades didácticas, para el profesorado de ciencias en ejercicio de Educación Secundaria*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia, Murcia.

Sánchez, G. y Valcárcel, M. V. (1993). "Diseño de unidades didácticas en el área de Ciencias Experimentales". *Enseñanza de las Ciencias,* 11 (1), 33-44.

Sánchez, G. y Valcárcel, V. (2000). "Relación entre el conocimiento científico y el conocimiento didáctico del contenido: un problema en la formación inicial del profesor de secundaria". *Alambique,* 24, 78-86.

Sanjosé, V.; García, J. y Ferrandis, I. (1989). "Una experiencia de educación ambiental desde los currícula educativos". *Investigación en la Escuela,* 7, 91-106.

Sanjosé, V.; Solaz, J. J. y Vidal, E. (1993). "Mejorando la actividad instruccional del texto educativo en ciencias: primeros resultados. Enseñanza de las Ciencias, 11 (2), 137-148.

Sanmartí, N. (2002). *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria.* Editorial Síntesis, Madrid.

Sanmartí, N. (2007). *10 ideas clave. Evaluar para aprender.* Graó, Barcelona.

Sanmartí, N. (2011). "Evaluar para aprender, evaluar para calificar". En Caamaño, A. (coord.). "Didáctica de la Física y la Química", 193-211. Graó, 1ª Ed.

Sanmartí, N. y Izquierdo, M. (1995). "The substantialisation of properties in pupils' thinking and in the history of science". *Science & Education,* 4, 349-369.

Sarabia, B. (1992). "El aprendizaje y la enseñanza de las actitudes". En Coll et al. "Los contenidos en la reforma". Santillana, Madrid.

Saura, O. (1996). Tesis Doctoral. *Aprendizaje de esquemas conceptuales y de contenidos procedimentales en el estudio de las Ondas, del Sonido y de la Luz a partir de una propuesta de enseñanza con un enfoque constructivista. Un trabajo experimental en el ámbito de la Educación Secundaria.* Universidad de Murcia, Murcia.

Schanck, R. C. y Abelson, R. P. (1987). *Guíones, planes, metas y entendimiento: un estudio de las estructuras del conocimiento humano.* Paidós, Barcelona.

Schauble, L.; Klopfer, L. E. y Raghavan, K. (1991). "Students' transition from an engincering model to a selence model of experimentation". *Journal of Research in Science Teaching,* 1 (8), 859-882.

SCHIBECI, R.A. (1984). "Attitudes to Science: an update". *Studies in Science Education*, 11, 26-59.

Schmid, G. B. (1982). "Energy and its carriers". *Physics Education,* 17, 212-218.

Schollum, B. (1981). *Burning: A working paper of the learning in science project No. 36.* University of Waikato, Hamilton (New Zealand).

Schwarz, C. V. y White, B. Y. (2005). "Metamodeling knowledge: Developing students' understanding of scientific modeling". *Cognition and Instruction,* 23 (2), 165-205.

Sciaretta, M. R.; Silli, R. y Vicentini-Missoni, M. (1990). "On the thermal properties of materials: common-sense knowledge of Italian students and teachers". *International Journal of Science Education,* 12 (4), 369-379.

Segura, D. (1991). "Una premisa para el cambio conceptual: el cambio metodológico". *Enseñanza de las Ciencias,* 9 (2), 175-180.

Selepe, C. y Bradley, J. (1997). "Student-Teacher's Conceptual Difficulties in Chemical Thermodynamics". En Sanders, M. (ed.). "Saarmse Fifth Annual Meeting", 316-321. University of the Witwatersrand, Johannesburg (South Africa).

Seminario Permanente de Física y Química "Vegas Altas del Guadiana". (1987). "Método activo en química de COU". *Enseñanza de las Ciencias,* 5 (3), 225-230.

Séré, M. G. (1991). "Guider le raisonnement d'éléves de college avec des modéles particulaires de la matiére". *ASTER,* 7, 72-102.

Sevilla, C. (1986). "Reflexiones en torno al concepto de energía. Implicaciones curriculares". *Enseñanza de las Ciencias,* 4 (3), 247-253 [ó 252].

Sexl, R. U. (1981). "Some observations concerning the teaching of the energy concept". *European Journal of Science Education,* 3 (3), 285-289.

Shayer, M. y Adey, P. (1986). *La Ciencia de Enseñar Ciencias*. Morata, Madrid.

Sherwood, B. A., 1983. "Pseudowork and real work". *American Journal Physics,* 52 (11), 597-602.

Shón, D. A. (1993). "Teaching and learning as a reflective conversation". En Montero, L. y Vez, J. M. "Las Didácticas Específicas en la Formación del Profesorado", I. Tórculo Artes Gráficas, Santiago de Compostela.

Sigüenza, A. F. y Sáez, M. J. (1990). "Análisis de resolución de problemas como estrategia de enseñanza de la Biología". *Enseñanza de las Ciencias,* 8 (3), 223-230.

Sjøberg, S. y Schreiner, C. (2010). "The ROSE project. An overview and key findings". Disponible en la dirección web http://roseproject.no/network/countries/norway/eng/nor-Sjoberg-Schreiner-overview-2010.pdf. Oslo.

Sjøberg y Schreiner, 2005).

Slezak, P. (1998). "Sociology of Scientific Knowledge and Scientific Education: Part I". En Matthews (ed.). "Constructivism in Science Education. A Philosophical Examination", 159-188. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (The Netherlands).

Slotta, J. D.; Chi, M. y Joram, E. (1995). "Assessing students' misclassifications of physics concepts: An ontological basis for conceptual change". Cognition and Instruction, 13 (3), 373-400.

Smith, C. L.; Maclin, D.; Houghton, C. y Hennessey, M. G. (2000). "Sixth-grade students' epistemologies of science: the impact of school science experiences on epistemological development". *Cognition and Instruction,* 18 (3), 349-422.

Smith, E. E. (1989). "Concepts and Indution". En: Posner, M. I. (Ed.). "Fotindations of Cognitive Science". A Bradford Book, The IVET Press, Cambridge, London.

Solaz, J. J. y Quílez, J. (2001). "Changes of extent of reaction in open chemical equilibria". *Chemistry Education: Research And Practice In Europe*, 2 (3), 303-312.

Solbes, J. (2009). "Dificultades de aprendizaje y cambio conceptual, procedimental y axiológico (I): resumen del camino avanzado". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias,* 6 (1), 2-20.

Solbes, J. (2011). "¿Por qué disminuye el alumnado de ciencias?" *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 67, 53-61.

Solbes, J. y Tarín, F. (1998). "Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía". *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (3), 387-397.

Solbes, J. y Tarín, F. (2004). "La conservación de la energía: un principio de toda la física. Una propuesta y unos resultados". *Enseñanza de las Ciencias,* 22 (2), 185-194.

Solbes, J. y Tarín, F. (2008). "Generalizando el concepto de energía y su conservación". *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 22, 155-180.

Solbes, J. y Torres, N. (2012). "Análisis de las competencias de pensamiento crítico desde el aborde de las cuestiones sociocientíficas: un estudio en el ámbito universitario". *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales,* 26, 247-269. ISSN 0214-4379

Solbes, J. y Traver, M. (2003). "Against a Negative Image of Science: History of Science and the Teaching of Physics and Chemistry". *Science & Education*, 12 (7), 703-717.

Solbes, J. y Traver, M. J. (1996). "La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química". *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (1), 103-112.

Solbes, J. y Vilches, A. (1989). "Interacciones Ciencia / Técnica / Sociedad. Un instrumento de cambio actitudinal". *Enseñanza de las Ciencias,* 7 (1), 14-20.

Solbes, J. y Vilches, A. (1997). "STS interactions and the teaching of Physics and Chemistry". *Science Education,* 81 (4), 377-386.

Solbes, J.; Domínguez-Sales, M. C.; Fernández-Sánchez, J.; Furió, C.; Cantó, J. R. y Guisasola, J. (2013). "¿El profesorado de Física y Química incorpora los resultados de la investigación en Didáctica?" *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*, 27, 155-178. ISSN 0214-4379.

Solbes, J.; Furió, C.; Gavidia, V. y Vilches, A. (2004). "Algunas consideraciones sobre la incidencia de la investigación educativa en la enseñanza de las ciencias". *Investigación en la Escuela*, 52, 103-110.

Solbes, J.; Furió, C.; Gavria, V. y Vilches, A. (2004). "Algunas consideraciones sobre la incidencia de la investigación educativa en la enseñanza de las ciencias". *Investigación en la Escuela,* 52, 103-109.

Solbes, J.; Guisasola, J. y Tarín, F. (2009). "Teaching energy conservation as a unifying principle in physics". *Journal of Science Education & Technology,* 18, 265-274.

Solbes, J.; Montserrat, R. y Furió, C. (2007). "El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza". *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 21, 91-117.

Solbes, J.; Ruiz, J. J. y Furió, C. (2010). "Debates y argumentación en las clases de física y química". *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 63, 65-75.

Solomon, J. (1982). "How children learn about energy, or Does the first law come first?" *School Science Review*, 224 (63), 415-422.

Solomon, J. (1983a). "Learning about energy: how pupils think in two domains". *European Journal of Science Education,* 5 (1), 49-59.

Solomon, J. (1984). "Alternative views of energy". *Physics Education,* 19 (2), 56.

Solomon, J. (1985). "Teaching the conservation of energy". *Physics Education,* 20, 165-170.

Solomon, J. (1986). "When should we start teaching physics?" *Physics Education,* 21, 152-154.

Solomon, J. (1987). "Social influences on the construction or 'pupils' undesrtanding of science". *Studies in Science Education,* 14 (1), 63-82.

Solomon, J. (1991). "Group discussions in the classroom". *School Science Review,* 72, 29-34.

Solomon, J. (1994). "The rise and fall of constructivism". *Studies in Science Education,* 23, 1-19.

Solomon, J. (1998). "The science curricula of Europe and the notion of scientific culture". En Roberts, D. A. y Óstman, L. (Eds.). "Problems of meaning in science curriculum". Teachers College Press, New York.

Solomon, J., (1983b). "Messy, contradictory and obstinately persistent: a study of children's out-of-school ideas about energy". *School Science Review,* 65, (231), 225-230.

Solsona, N. y Izquierdo, M. (1999). "El aprendizaje del concepto de cambio químico en el alumnado de secundaria. *Investigación en la Escuela,* 38, 65-75.

Solsona, N.; Pla, J.; Izquierdo, M. y de Jong, O. (2003). "Exploring the development of student's conceptual profiles chemical change". *International Journal Science Education,* 23 (1), 3-12.

Sözbilir, M. (2001). Tesis Doctoral. *A study of undergraduates' understandings of key chemical ideas in Thermodynamics*. University of York, York.

Sözbilir, M. (2002). "Turkish chemistry undergraduate students' misunderstandings of Gibbs free energy". *University Chemistry Education,* 6, 73-83.

Sözbilir, M. (2003). "What students understand from entropy? A review of selected literature". *Journal of Baltic Science Education*, 2, 21-27.

Sözbilir, M. (2004a). "Students' ideas and misunderstandings of enthalpy and spontaneity: a review of selected researches". *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi.* 26, 155-159.

Sözbilir, M. (2004b). "What Makes Physical Chemistry Difficult? Perceptions of Turkish Chemistry Undergraduates and Lecturers". *Journal of Chemical Education*, 81 (4), 573-578.

Sözbilir, M. (2008). "What students' understand from entropy Gibbs free energy and spontaneity? A review of selected literature". Disponible en http://educa.univpm.it/inglese/ms-entro.html.

Sözbilir, M. y Bennett, J. M. (2007). "A study of turkish Chemistry undergraduates' understandings of entropy". *Journal of Chemical Education,* 84 (7), 1204-1208.

Sözbilir, M.; Pýnarbaþý, T. y Nurtaç, C. N. (2010). "Prospective chemistry teachers' conceptions of chemical thermodynamics and kinetics". *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 6 (2), 111-120.

Spencer, J. N. (1985). "Heat, Work, and Metabolism". Journal of Chemical Education, 62 (7), 571-574.

Sreenivasulu, B. y Subramaniam, R. (2013). "University Students' Understanding of Chemical Thermodynamics". *International Journal of Science Education*, 35 (4), 601-635.

Stavridou, H. y Solomonidou, C. (1989). "Physical phenomena - chemical phenomena: Do pupils make the distinction?" *International Journal of Science Education,* 11 (1), 83-92.

Stavridou, H. y Solomonidou, C. (1998). "Conceptual Reorganization and construction of the chemical reaction concept during secundary school". *International Journal of Science Education,* 20 (2), 205-221.

Stavy, R. (1990). "Children's conception of changes in the satate of matter: from liquid (or solid) to gas". *Journal of Research in Science Teaching,* 27 (3), 247-266.

Stavy, R. (1990a). "Pupils' problems in understanding conservation of matter". *International Journal of Science Education,* 12 (5), 501-512.

Stavy, R. y Berkowitz, B. (1980). "Cognitive conflicts as a basis for teaching cuantitative aspects of the concept of temperature". *Science Education,* 64, 679-692.

Storey, R. D. (1992). "Textbook errors & misconceptions in biology: Cell energetics". *The American Biology Teacher.* 54, 161-166.

Strube, P. (1988). "The presentation of energy and fields in physics texts - a case of literary inertia". *Physics Education,* 23, 366-371.

Stylianidou, F. (2002). "Analysis of science textbook pictures about energy and pupils' readings of them", *International Journal of Science Education*, 24 (3), 257-283.

Stylianidou, F. y Boohan, R. (1998). "Understanding Why Things Happen: Case-Studies of Pupils Using an Abstract Picture Language to Represent the Nature of Changes". *Research in Science Education*, 28 (4), 447-462.

Stylianidou, F. y Ogborn, J. (1999). "Teachers' transformations of innovations: the case of teaching 'Energy' in English secondary schools". European Commission, DG XII (Contract SOE2 CT97 2020), Science Teacher Training in an Information Society (STTIS), University of Sussex, UK.

Suchting, W. A. (1992). "Construtivism deconstructed". *Science & Education,* 1 (3), 223-254.

Summers, M. K. (1983). "Teaching heat - an analysis of misconceptions". *School Science Review,* 64, 670-676.

Swackhamer, G. (2005). "Cognitive resources for understanding energy". Disponible en http://modeling.la.asu.edu/modeling/CognitiveResources-Energy.pdf.

Swain, J. L. (1988). "Assesing chemical process skills". *Educación in Chemistry,* Sept., 142-144.

Taber, K. (1989). "Energy -by many other names". *School Science Review*, 70 (252), 57-62.

Taber, K. (1996). "The secret life of the chemical bond: students' anthropomorphic and animistic references to bonding". *International Journal of Science Education,* 18 (5), 557-568.

Taber, K. S. (1994). "Misunderstanding the ionic bond". *Education in Chemistry* , 31 (4), 100-103.

Taber, K. S. (2000). "Finding the optimum level of simplification: The case of teaching about heat and temperature". *Physics Education,* 35 (5), 320-325.

Taber, K. S. (2003). "Mediating Mental Models of Metals: Acknowledging the Priority of the Learner's Prior Learning". *Science Education,* 87 (7), 732-758.

Talanquer, V. (2005). "El químico intuitivo". *Educación Química,* 16 (4), 114-122.

Tamir, P. y García, M. P. (1992). "Características de los ejercicios de prácticas de laboratorio incluidos en los libros de texto de ciencias utilizados en Cataluña". *Enseñanza de las Ciencias,* 10 (1), 3-12.

Tan, K. D. y Treagust, D. F. (1999). "Evaluating students' understanding of chemical bonding". *School Science Review* , 81 (294), 75-83.

Tarín, F. (2000). Tesis Doctoral. *El principio de conservación de la energía y sus implicaciones didácticas*. Universidad de Valencia, Valencia.

Tarsitani, C. y Vicentini, M. (1996). "Scientific mental representations of thermodynamics". Science Education, 5, 51-68.

Taylor, S. J. y Bogdan, R. (1996). Introducción a los métodos cualitativos de investigación. La búsqueda de significados. Ed. Paidós, Barcelona.

Teichert, M. A. y Stacy, A. M. (2002). "Promoting understanding of chemical bonding and spontaneity through student explanation and integration of ideas". *Journal of Research in Science Teaching,* 39 (6), 464-496.

Ten Hoor, M. J. (2003). "The Relative Explosive Power of Some Explosives". *Journal of Chemical Education*, 80 (12), 1397-1400.

Thomas, P. L. y Schwenz, R. W. (1998). "College physical chemistry students' conceptions of equilibrium and fundamental Thermodynamics". *Journal of Research in Science Teaching,* 35 (10), 1151-1160.

Thomsen, V. B. E. (2000). "Le Châtelier's principle in the sciences". *Journal of Chemical Education*, 77 (2), 173-176.

Tiberghien, A. (1980). "Un example de restructuration de l'organisation conceptuell à l'occasion d'un enseignement concernant la notion de chaleur". *Compte-rendus de Deuxiémes Journées International sur l'Education Scientifique,* Chamonix (Francia).

Tiberghien, A. (1989). "Calor y Temperatura. Desarrollo de las ideas mediante la enseñanza". En: Driver et al. "Ideas científicas en la infancia y en la adolescencia". MEC-Morata, Madrid.

Tomanek, D. (1994). "Cases of content: studying content as a part of a curriculum process". *Science Education*, 78 (1), 73-82.

Torres Zúñiga, V. (2011). "Aplicación de weblogs para incrementar el aprendizaje sobre termodinámica a nivel preuniversitario". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias,* 8 (1), 71-83.

Torres, J. (2008). "Obviando el debate sobre la cultura en el sistema educativo: Cómo ser competentes sin conocimientos". En Gimeno Sacristán, J. (comp.). "Educar por competencias: ¿Qué hay de nuevo?" Morata, Madrid.

Toulmin, S. (1958). *The uses ofArgument.* Cambridge University Press, New York.

Toulmin, S.; Rieke, R. y Janik, A. (1979). *An introduction to reasoning.* Macmillan Publishing Co., New York.

Treagust, D. F.; Chittleborough, G. y Mamiala, T. L. (2003). "The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations". *International Journal of Science Education,* 25, 1353-1360.

Treptow, R. S. y Jean, L. (1998). "The iron blast furnace. a study in chemical thermodynamics". Journal of chemical Education, 75 (1), 43-47.

Trumper, R. (1990a). "Energy and a constructivist way of teaching". *Physics Education,* 25, 208-212.

Trumper, R. (1990b). "Being constructive: An alternative approach to the teaching of the energy concept - part one". *International Journal of Science Education,* 12 (4), 343-354.

Trumper, R. (1991). "Being constructive: An alternative approach to the teaching of the energy concept - part two". *International Journal of Science Education,* 13 (1), 1-10.

Trumper, R. (1993). "Children's energy concepts: A cross-age study". *International Journal of Science Education,* 15 (2), 139-148.

Trumper, R. (1998). "A longitudinal study of physics students' conceptions of energy in pre-service training for high school teachers". *Journal of Science Education and Technology,* 7 (4), 311-317.

Trumper, R. y Gorsky, P. (1993). "Learning about energy: the influence of alternative frameworks, cognitive levels, and closed-mindedness". *Journal of Research in Science Teaching,* 30 (7), 637-748.

Trumper, R.; Raviolo, A. y Shnersch, A. M. (2000). "A cross-cultural survey of conceptions of energy among elementary school teachers in training -empirical results from Israel and Argentina". *Teaching and Teacher Education*, 16 (7), 697-714.

Tuckman, B. (1978). *Conducting educational research.* Harcourt Brace Jovanovich, New York.

Tuckman, D. G. (1978). "Interpretation of the activation energy". *Journal of Chemical Education,* 55 (5), 309-311.

Turégano, J. A.; Velasco, C. y Gómez, T. (2001). "Termograf, a didactic tool for teaching and learning thermodynamics". *American Society for Engineering*

Education Annual Conference & Exposition. Alburquerque. Disponible en la web: http://termograf.unizar.es/colaboracion/index.php/archivos/investigacion/132-termograf-a-didactic-tool-for-teaching-and-learning-thermodynamics.html.

Tyas, T. y Cabot, J. (1999). "A role-play to ilustrate the energy changes occurring in an exothermic reaction". *School Science Review,* 80 (293), 113-114.

U.E. (2005). "Recomendación del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de marzo de 2005, sobre las competencias clave para el aprendizaje permanente". Diario Oficial de la Unión Europea, Bruselas. a fecha de A COMPLETAR//2006.

U.E. (2006b). "Competencias clave para el aprendizaje permanente. Un marco de referencia europeo. Anexo a la Recomendación del parlamento europeo y del consejo sobre las competencias clave para el aprendizaje permanente". Diario Oficial de la Unión Europea. Disponible en http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX.32006H0962.

U.E. (30/12/2006a). "Recomendación del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006, sobre las competencias clave para el aprendizaje permanente". *Diario Oficial de la Unión Europea*, Bruselas.

Ulloa Lugo, N. Y. (2006). Tesis Doctoral. *Origen y evolución del concepto de entropía. Representación e implicaciones para la enseñanza*. Universidad Pedagógica Nacional, Méjico D. F.

Ünal, S.; Çalik, M.; Ayas, A. y Coll, R. K. (2006). "A review of chemical bonding studies: needs, aims, methods of exploring students' conceptions, general knowledge claims and students' alternative conceptions". *Research in Science and Technological Education,* 24 (2), 141-172.

UNESCO (1999). "Proyecto de programa en pro de la ciencia: marco general de acción". *Conferencia Mundial sobre la Ciencia para el Siglo XXI: un nuevo compromiso*. Budapest (Hungría), 26 junio - 1 julio. También disponible en http://www.campus-oei.org/salactsi/budapestmarco.htm.

UNESCO. (2005). *Educación para todos. El imperativo de la calidad*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, París.

Valcárcel, M. V.; Pro, A.; Banet, E. y Sánchez, G. (1990). *Problemática Didáctica del aprendizaje de las Ciencias Experimentales.* Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Murcia, Murcia.

Valente, M y Neto, A. J. (1992). "El ordenador y su contribución a la superación de las dificultades de aprendizaje en Mecánica. *Enseñanza de las Ciencias,* 10 (1), 80-85.

Valhov, S. J. y Treagust, D. F. (1988). "Students' knowledge of energy and attitudes to energy conservation". *School Science and Mathematics*, 88 (6), 452-458.

Van Huis, C. y Van Den Berg, E. (1993). "Teaching energy: a systems approach". *Physics Education,* 28, 146-153.

Van Lehn, K. (1989). "Problem solving and cognitive skill acquisition". En: Posner, M. I. (Ed.) "Foundations of cognitive Science". A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, London.

Van Roon, P. H.; van Sprang, H. F. y Verdonk, A. H. (1994). "Work and heat: on a road towards thermodynamics". *International Journal of Science Education,* 16 (2), 131-144.

Varela, M. P. et al. (1997). "Un desarrollo curricular de la física centrado en la energía. Aplicación al estudio de la energía mecánica". *Enseñanza de las Ciencias,* núm. extra, 327-328.

Vázquez Díaz, J. (1987). "Algunos aspectos a considerar en la didáctica del calor". *Enseñanza de las Ciencias,* 5 (3), 235-238.

Vázquez, A. y Manassero, M. A. (1995). "Actitudes relacionadas con la ciencia: una revisión conceptual". *Enseñanza de las Ciencias,* 13 (3), 337-346.

Vázquez, A. y Manassero, M. A. (2008). "El declive de las actitudes hacia la ciencia de los estudiantes: Un indicador inquietante para la educación científica". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las ciencias*, 5 (3), 274-292.

Vázquez, A.; Acevedo, J. A. y Manassero, M. A. (2005). "Más allá de una enseñanza de las ciencias para científicos: hacia una educación científica humanística". *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, 4 (2). Disponible en http://saum.uvigo.es/reec.

Vergnaud, G. (1997). *Aprendizajes y Didácticas: ¿Qué hay de nuevo?* Edicial, Buenos Aires.

Viau, J. E. y Moro, L. E. (2010). "El cuento del Demonio de Maxwell, una propuesta didáctica para la enseñanza de conceptos básicos de Termodinámica". *Formación Universitaria*, 3 (1), 3-10. También disponible en la web: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062010000100002.

Viennot, L. (1989). "L'enseignement des sciences physiques objet de recherche". *Bulletin de L'Union des Physiciens,* 716, 899-910.

Viennot, L. (1998). "Experimental Facts and Ways of Reasoning in Thermodynamics: Learners' Common Approach". En Tiberghien, A.;. Jossem, E. L. y Barojas, J. "Connecting Research in Physics Education with Teacher Education". I.C.P.E. The International Commission on Physics Education. Disponible también en http://www.physics.ohio-state.edu/ jossem/ICPE/BOOKS.html.

Vilches, A.; Solbes, P. y Gil, D. (2004). "Alfabetización científica para todos contra ciencia para futuros científicos". *Alambique,* 41, 89-98.

Vilvhrd, A. (2007). "Una unidad clave para la implicación del alumnado: ¿Cómo empezar?" *Alambique*, 52, 28-38.

Vosniadou, S. (1994). "Capturing and modeling the process of conceptual change". *Learning and Instruction,* 4 (1), 45-69.

Vosniadou, S. y Ioannides, C. (1998). "From conceptual development to science education: a psychological point of view". *International Journal of Science Education,* 20 (10), 1213-1230.

VV.AA. (1964). *Enciclopedia Salvat de la Ciencia y de la Tecnología*. Salvat Editores, S. A. Barcelona.

VV.AA. (1990). "Monográfico sobre mapas conceptuales". *Journal of Research in Science Teaching,* 27 (10).

VV.AA. (2009b). Monográfico. "Competencia científica: poner en práctica los saberes en ciencias". *Aula de Innovación Educativa*, 186, 6.

VV.AA. "Proyecto Roda-Mind the Gap". USC. Disponible en www.rodausc.eu.

Vygotsky, L. S. (1964). *Pensamiento y lenguaje. Teoría del desarrollo cultural de las funciones psíquicas.* Pléyade, Buenos Aires.

Vygotsky, L. S. (1979). *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*. Crítica, Barcelona.

Waite, B. A. (1985). "A gas kinetic explanation of symple thermodynamic processes". *Journal of Chemical Education*, 62 (2), 224-227.

Wallace, J. y Mintzes, J. (1990). "The concept map as a research tool: exploring conceptual change in Biology". *Journal of Research in Science Teaching,* 27 (10), 1033-1052.

Wandersee, J. H.; Mintzess, J. J. y Novak, J. D. (1994). "Research on alternative conceptions in science". En Gabel, D. L. (eds). "Handbook of Research on Science Teaching and Learning". MacMillan Pub Co., New York.

Warren, J. (1986). "At what age should energy be taught?" *Physics Education,* 21, 154-156.

Warren, J. W. (1976). "The mistery of mass-energy". *Physics Education,* 11, 52-54.

Warren, J. W. (1982). "The nature of energy". *European Journal of Science Education,* 4 (3), 295-297.

Warren, J. W. (1983). "Energy and its carriers: a critical analysis". *Physics Education,* 18, 209-212.

Watson, J. R.; Prieto, T. y Dillon, J. S. (1997). "Consistency in students' explanations about combustion". *Science Education* 81, 425-444.

Watson, L. A. y Eisenstein, O. (2002). "Entropy Explained: The Origin of Some Simple Trends". *Journal of Chemical Education*, 79 (10), 1269-1277.

Watts, D. M. (1983). "Some alternative views of energy". *Physics Education,* 18, 213-217.

Weiss, H. M. (2001). "Developing an intuitive understanding of free energy". *Journal of Chemical Education*, 78 (10), 1362-1364.

Wertsch, J. V. (1993). *Voces de la mente. Un enfoque sociocultural para el estudio de la acción mediada.* Visor, Madrid.

Wheeler, A. E. y Kass, H. (1978). "Student misconceptions in chemical equilibrium". *Science education,* 62 (2), 223-232.

White, R. T. (1988). *Learning Science.* Basil BlackweIl, Oxford.

Williamson, B. E. y Morikawa, T. (2002). "A Chemically Relevant Model for Teaching the Second Law of Thermodynamics". *Journal of Chemical Education*, 79 (3), 339-342.

Wójcik, J. F. (2006). "A Response to Chemical Thermodynamics in the Real World - Letters". *Journal of Chemical Education*, 83 (1), 39.

Wolfson, A. J.; Rowland, S. L.; Lawrie, G. A. y Wright, A. H. (2014). "Student conceptions about energy transformations: progression from general chemistry to biochemistry". *Chemistry Education Research and Practice in Europe,* 15, 168-183.

Wolpert, L. (1994). *La naturaleza no natural de la ciencia.* Acento, Madrid.

Wood, S. E. y Battino, R. (1996). "The Gibbs function controversy". *Journal of Chemical Education*, 73 (5), 408-411.

Wood, S. E. y Battino, R. (2001). "Explaining Entropy Pictorially". *Journal of Chemical Education*, 78 (3), 311.

Wright, G. P. (1974). "Contre l'einseignement de la Thermodynamique au lycée". *Education in Chemistry*, 11, 9-10.

X.U.G.A. (13/7/2007). "Decreto 133/2007, do 5 de xullo, polo que se regulan as ensinanzas da educación secundaria obrigatoria na Comunidade Autónoma de Galicia". *Diario Oficial de Galicia,* 136, 12032-12199.

X.U.G.A. (15 de 07 de 2002). "Decreto 231/2002", de 6 de junio, que modifica el Decreto 275/1994, de 29 de julio, por el que se establece el currículo del Bachillerato en la Comunidad Autónoma de Galicia. *Diario Oficial de Galicia.*

X.U.G.A. (23/6/2008). "Decreto 126/2008, de 19 de junio, por el que se establece la ordenación y el currículo de Bachillerato en la Comunidad Autónoma de Galicia". *Diario Oficial de Galicia*, Santiago.

Yager, R. E. y Kahle, J. B. (1982). "Priorities for need policies and research in science education". *Journal of Research in Science Teaching,* 19, 523-530.

Yager, R. E. y Penick, J. E. (1986). "Perception of four groups towards science classes, teachers and value of science". *Science Education*, 70 (4), 335-363.

Yarroch, W. (1985). "Student understanding of chemical equation balancing". *Journal of Research in Science Teaching,* 22, 449–459.

Yerrick, R. K.; Pedersen, J. E. y Arnason, J. (1998). ""We are just spectators": a case study of science teaching, epistemology, and classroom management". *Science Education,* 82, 619-648.

Zalamea, E. y París, R. (1992). "¿Es la masa la medida de la inercia?" *Enseñanza de las Ciencias,* 10 (2), 212-215.

Zamorano, R. O.; Gibbs, H. M.; Moro, L. E. y Viau, J. E. (2006). "Evaluación de un modelo didáctico analógico para el aprendizaje de la energía interna y temperatura". *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las Ciencias*, 3 (3), 392-408.

Zamorano, R. O.; Moro, L. E. y Gibbs, H. M. (2011). "Aproximación didáctica a la Termodinámica con modelos y literatura de ciencia ficción". *Ciênc. educ. (Bauru)*, 17 (2), 401-419. Consultado en la web http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132011000200010. Ver: revista@fc.unesp.br.

Zemansky, M. W. (1970). "The use and misuse of the word 'heat' in physics teaching". *The Physics Teacher*, 8, 295-300.

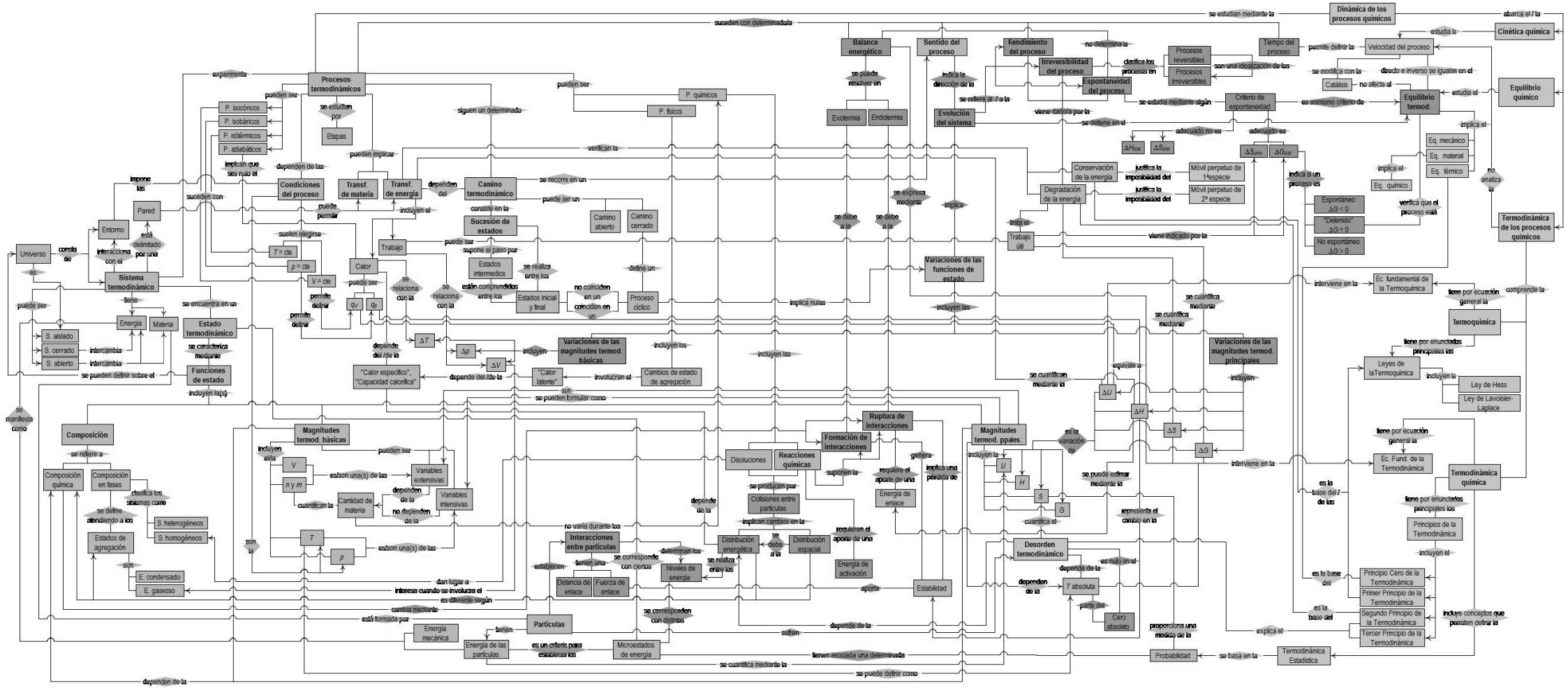
Zielinski, T. J. (2004). "Learning that prepares for more learning: symbolic Mathematics in Physical Chemistry". *Journal of Chemical Education*, 81 (4), 605-606.

Esquema referencial

Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Leyenda

- *Sistemas termodinámicos* ***(ER1)***
- *Procesos termodinámicos* ***(ER2)***
- *Aspectos dinámicos de los procesos físicos y químicos* ***(ER3)***
- *Dinámica de los procesos químicos* ***(ER4)***
- *Aspectos microscópicos de los procesos físicos y químicos* ***(ER5)***

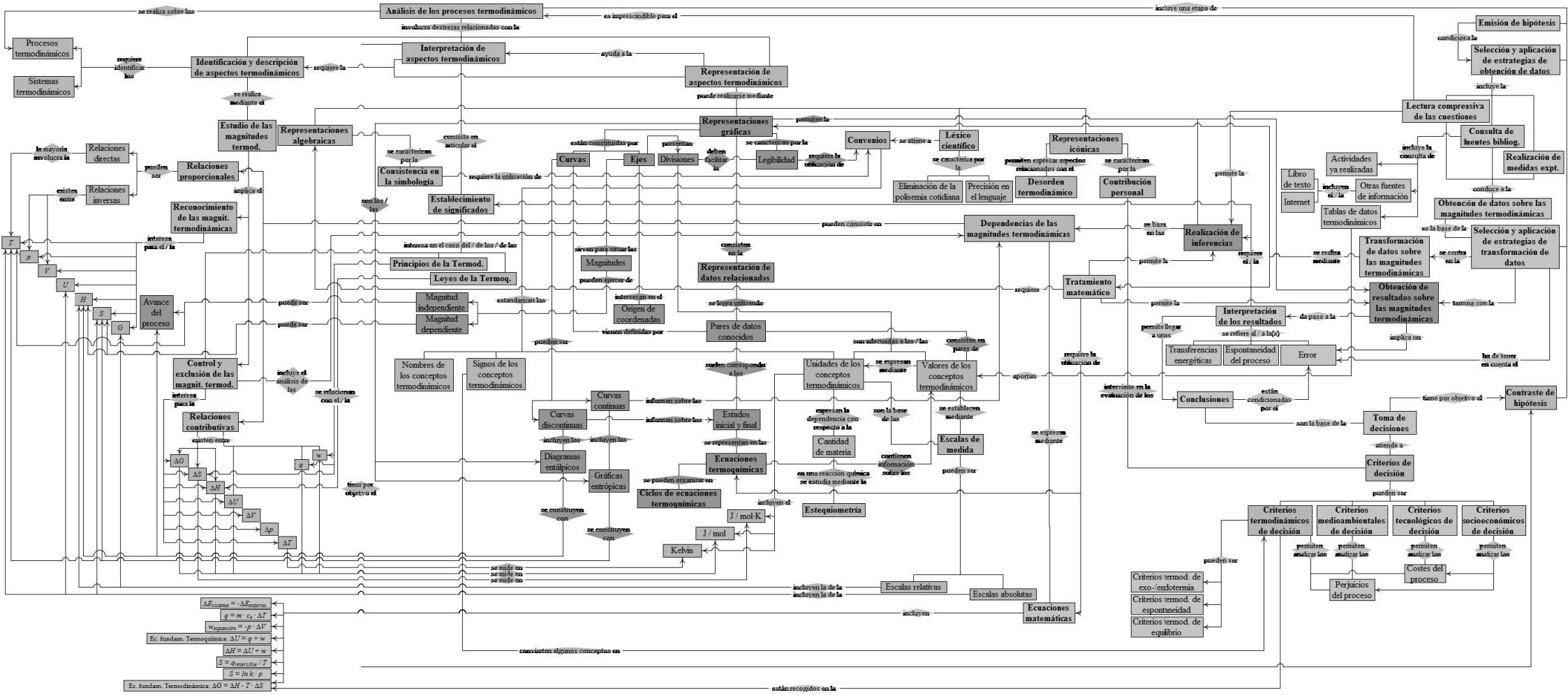


Esquema referencial

Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química **(EAT)**

Leyenda

- *Identificación, descripción e interpretación de aspectos termodinámicos* ***(EA1)***
- *Representación algebraica, léxica e icónica de aspectos termodinámicos* ***(EA2)***
- *Representación gráfica de aspectos termodinámicos* ***(EA3)***
- *Resolución de problemas de Termoquímica y Termodinámica Química* ***(EA4)***



Esquema idiosincrásico

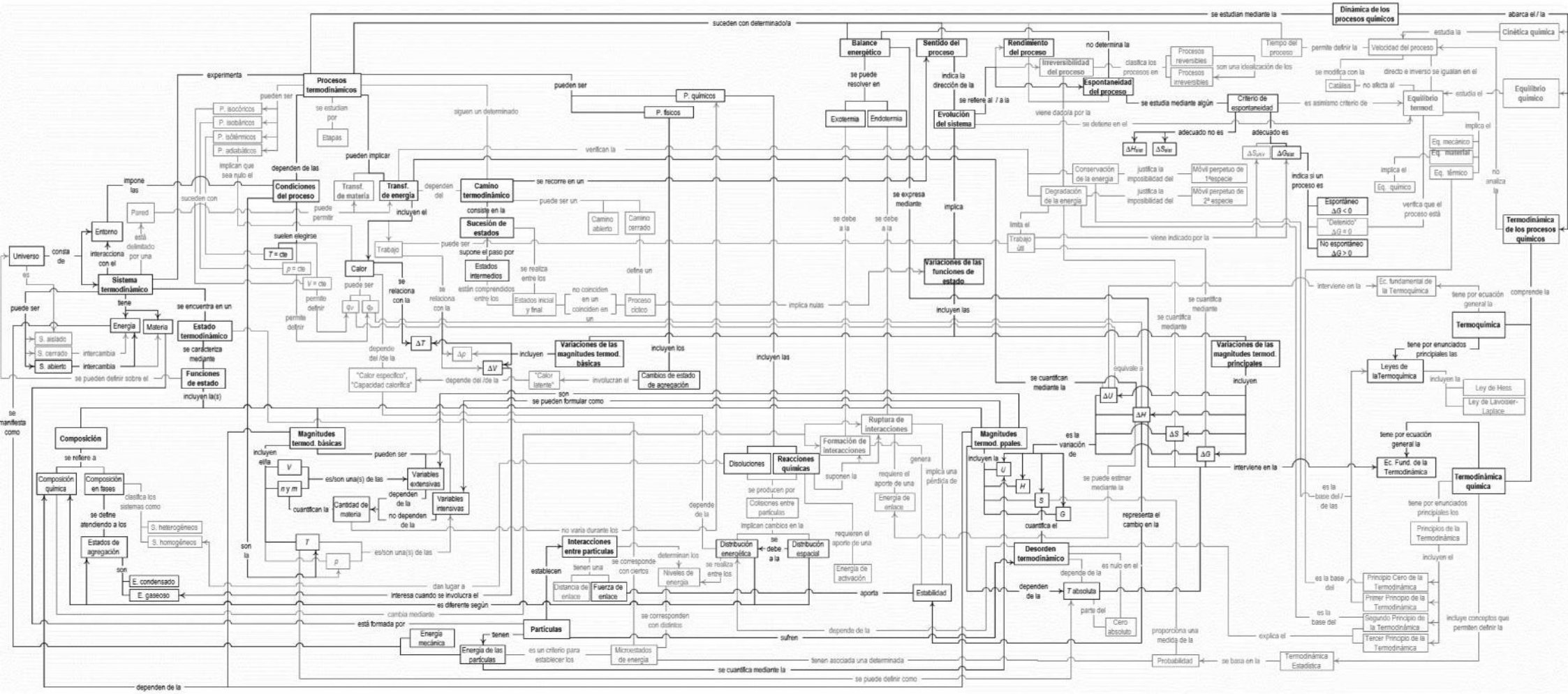
Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Adela

Momento del aprendizaje: caracterización final *(cf)*

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*



Esquema idiosincrásico

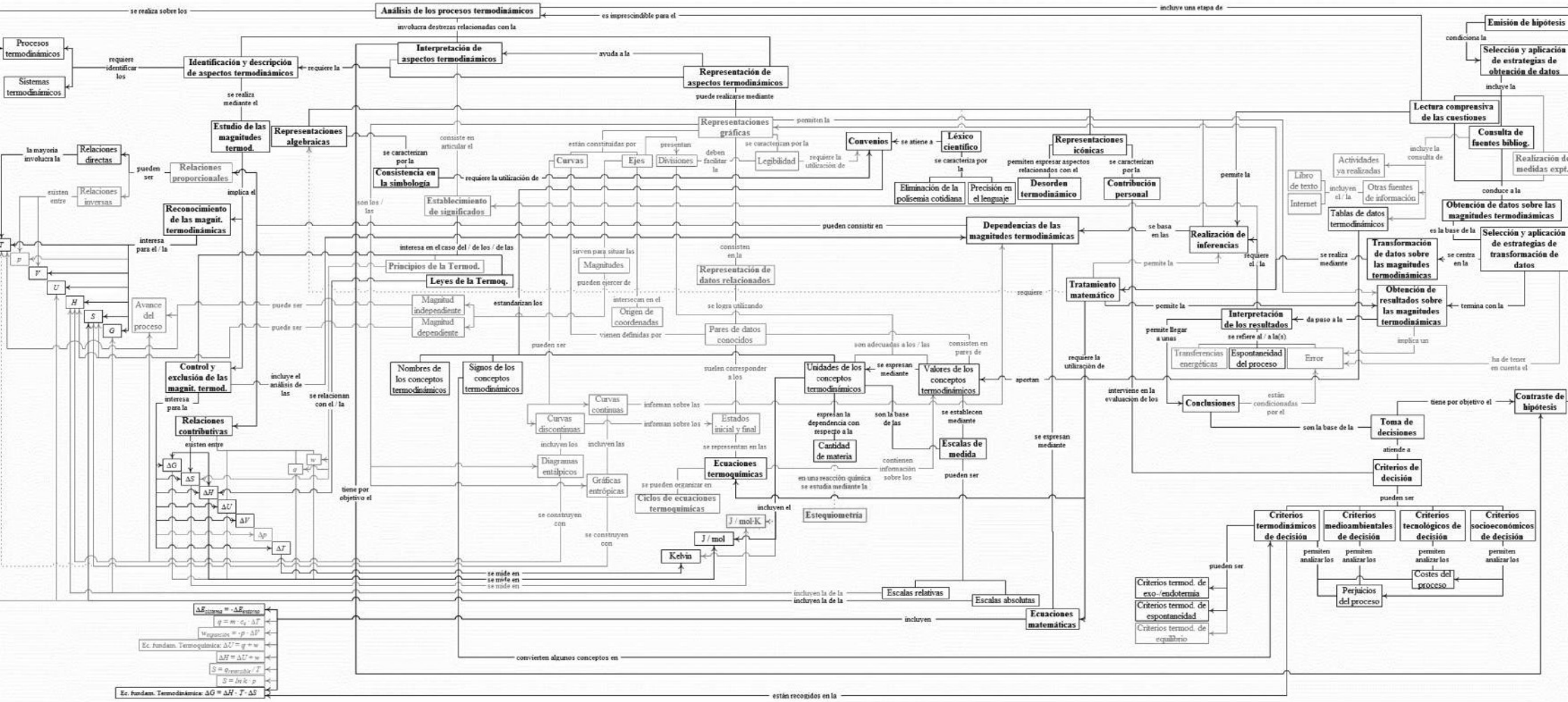
Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Adela

Momento del aprendizaje: caracterización final *(cf)*

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*



Esquema idiosincrásico

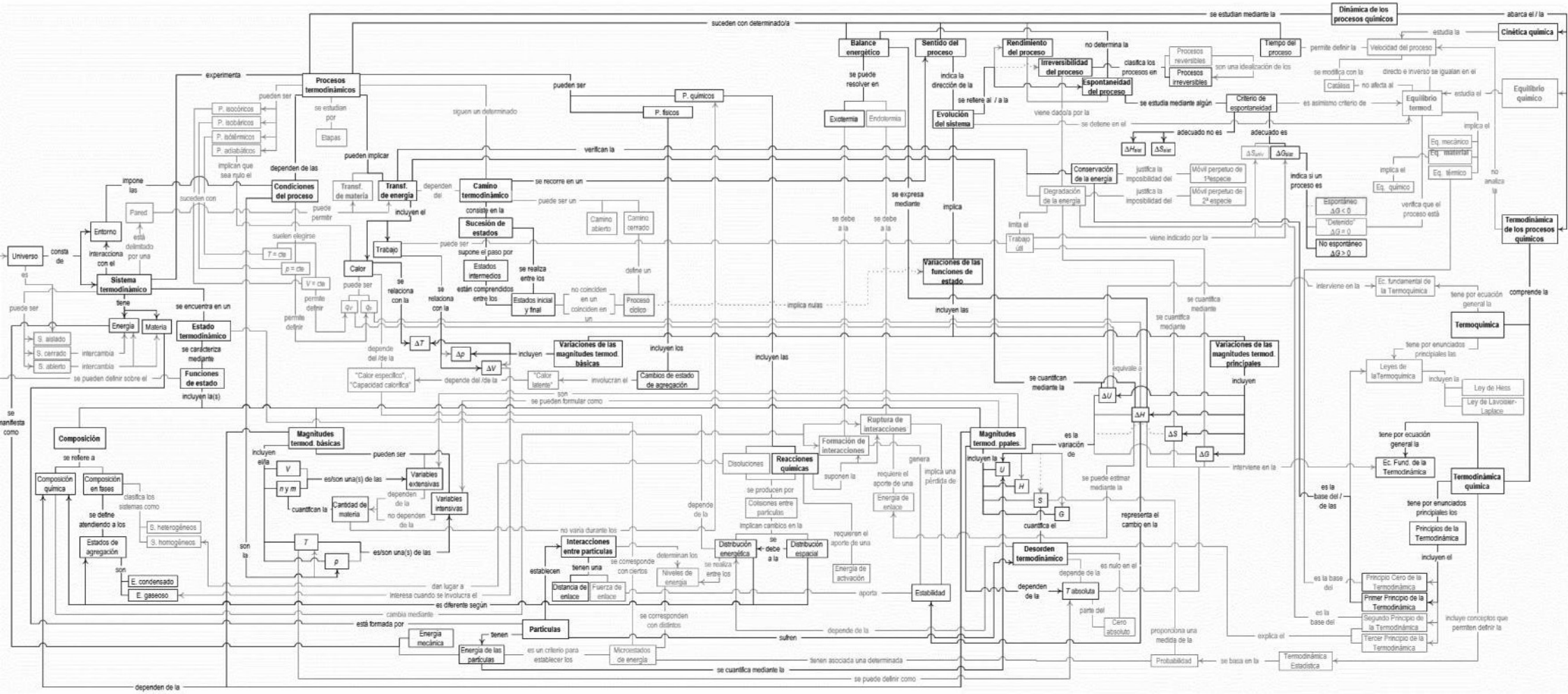
Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Adela

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*



Esquema idiosincrásico

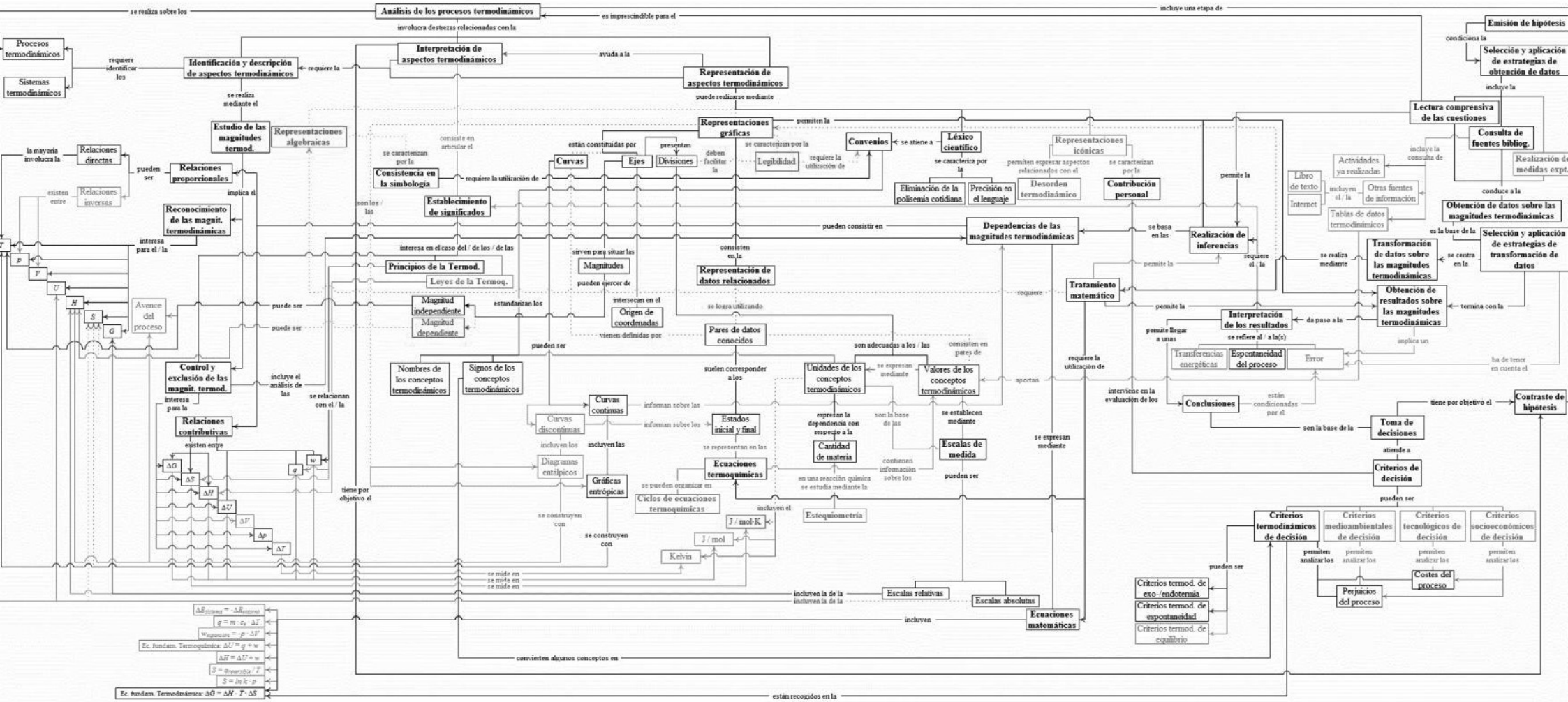
Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Adela

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*

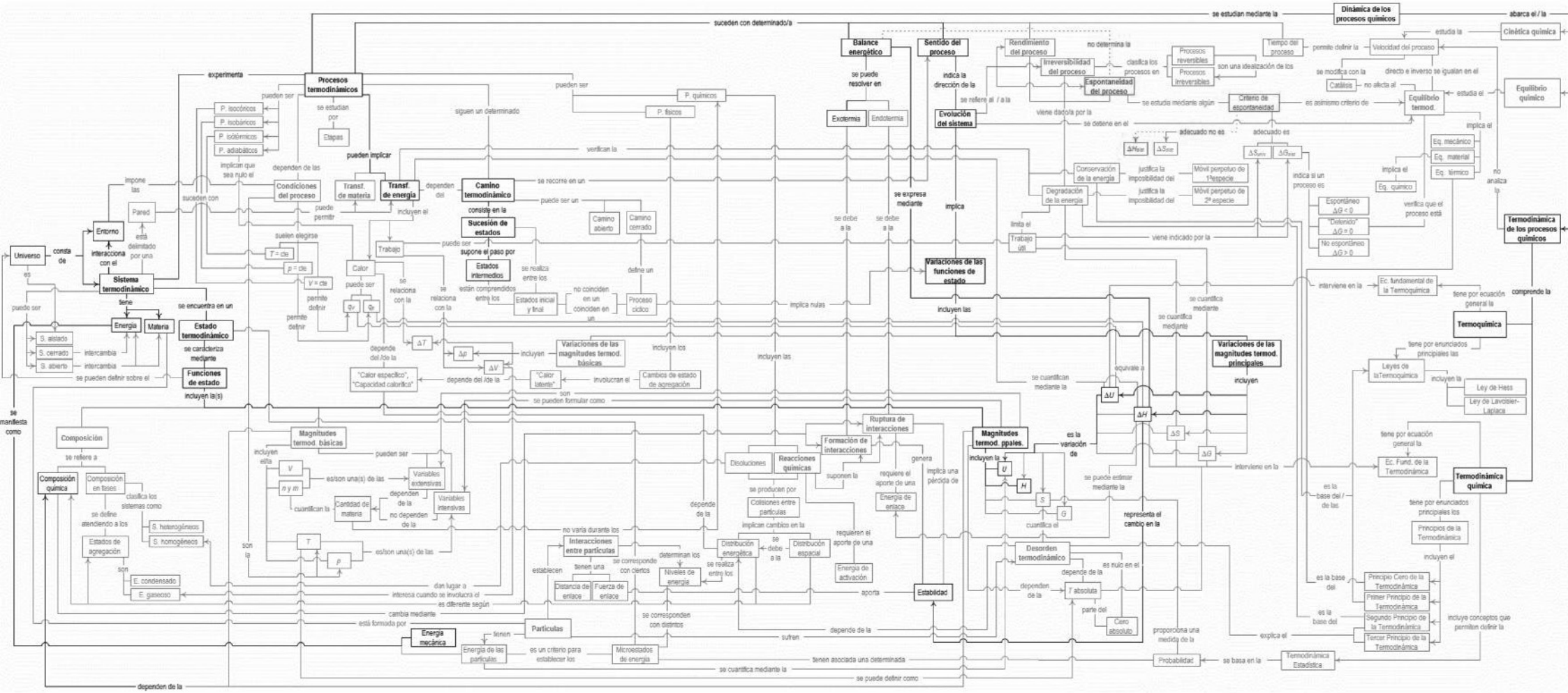


Esquema idiosincrásico

Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Brais

Momento del aprendizaje: caracterización final ***(cf)***



Esquema idiosincrásico

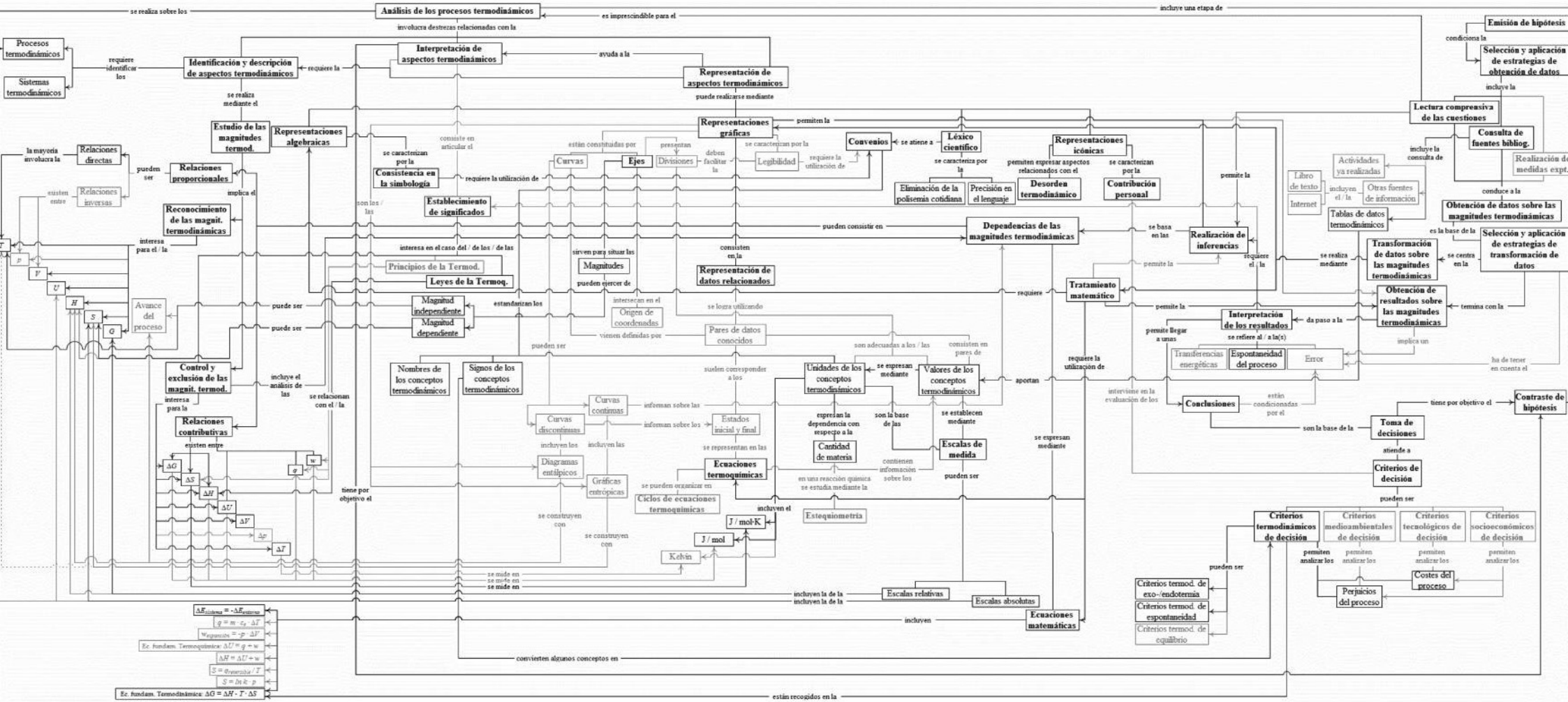
Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Clara

Momento del aprendizaje: caracterización final *(cf)*

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*

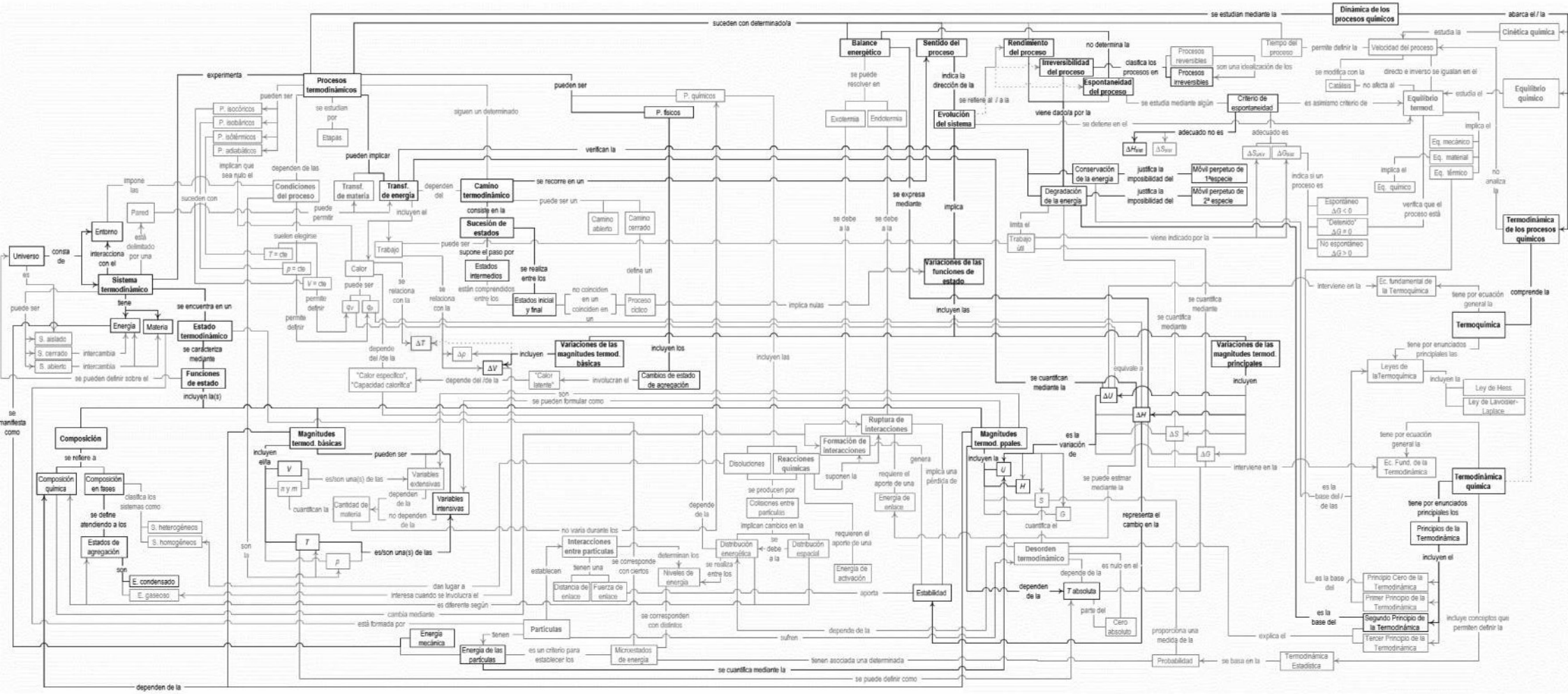


Esquema idiosincrásico

Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Brais

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***



Esquema idiosincrásico

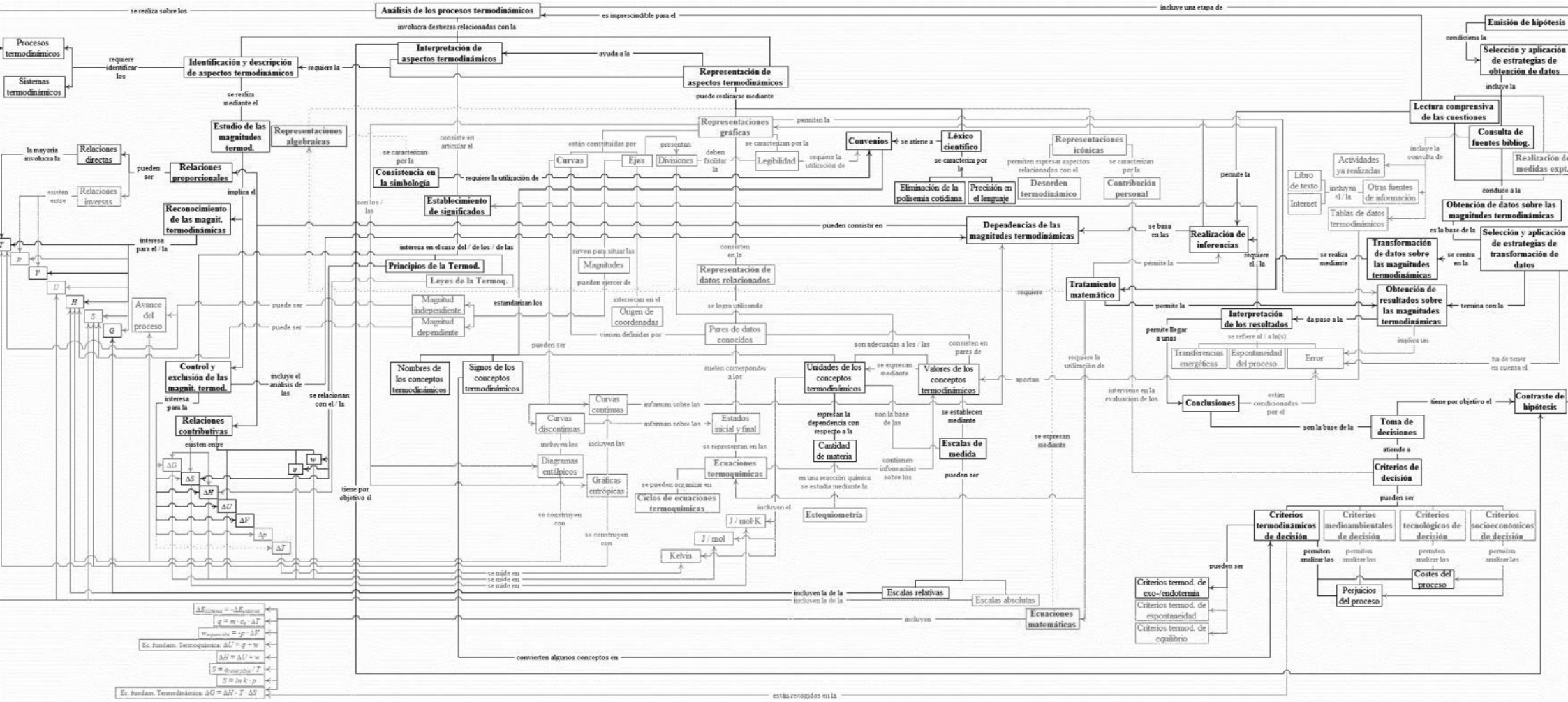
Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Brais

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*

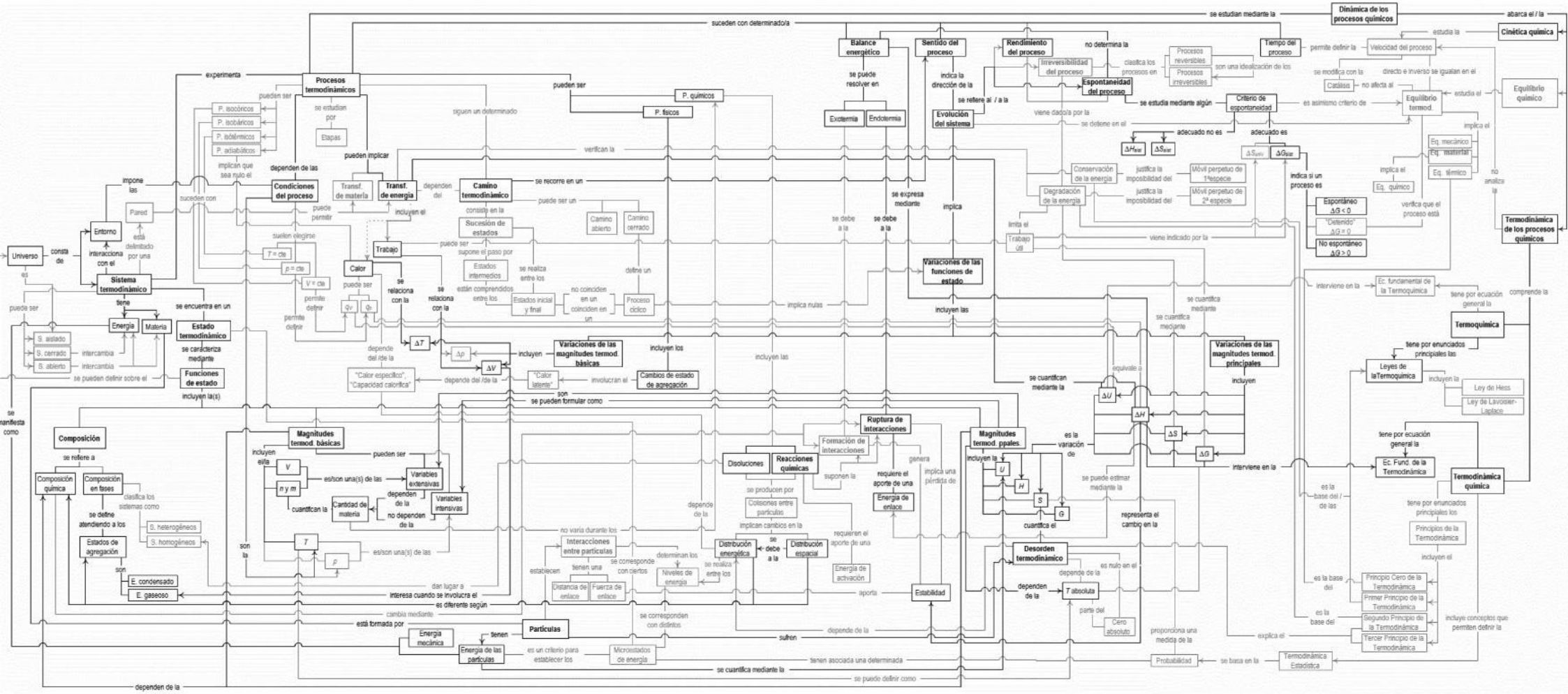


Esquema idiosincrásico

Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Clara

Momento del aprendizaje: caracterización final *(cf)*



Esquema idiosincrásico

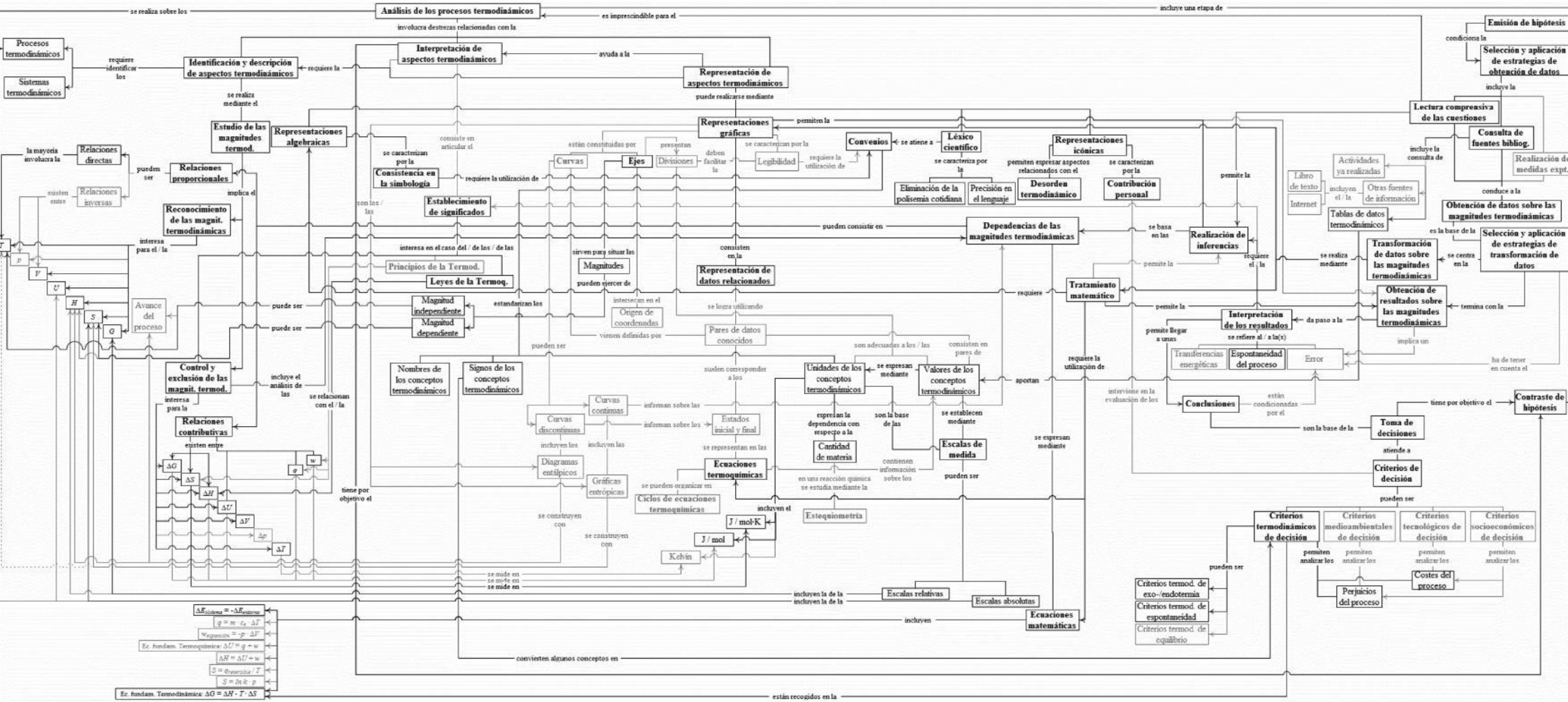
Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Clara

Momento del aprendizaje: caracterización final *(cf)*

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*



Esquema idiosincrásico

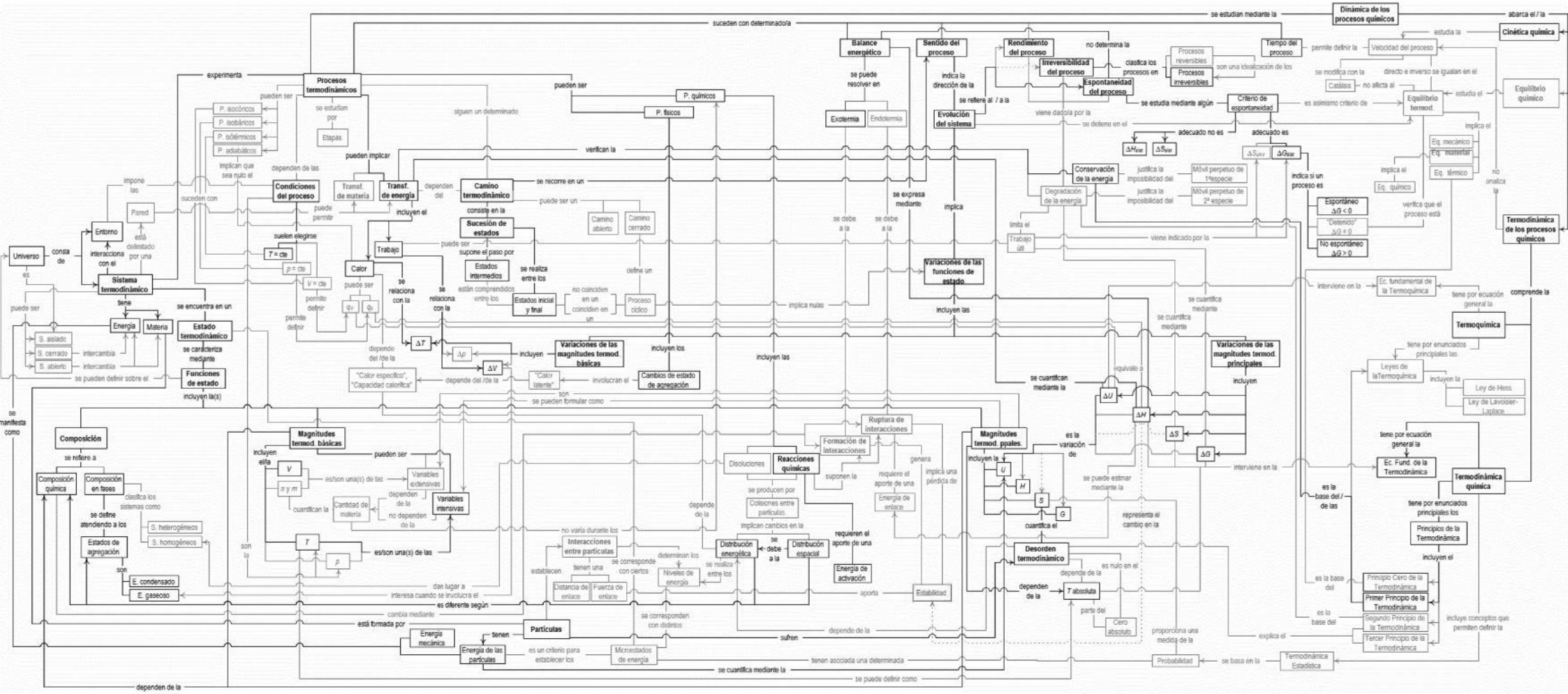
Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Clara

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*



Esquema idiosincrásico

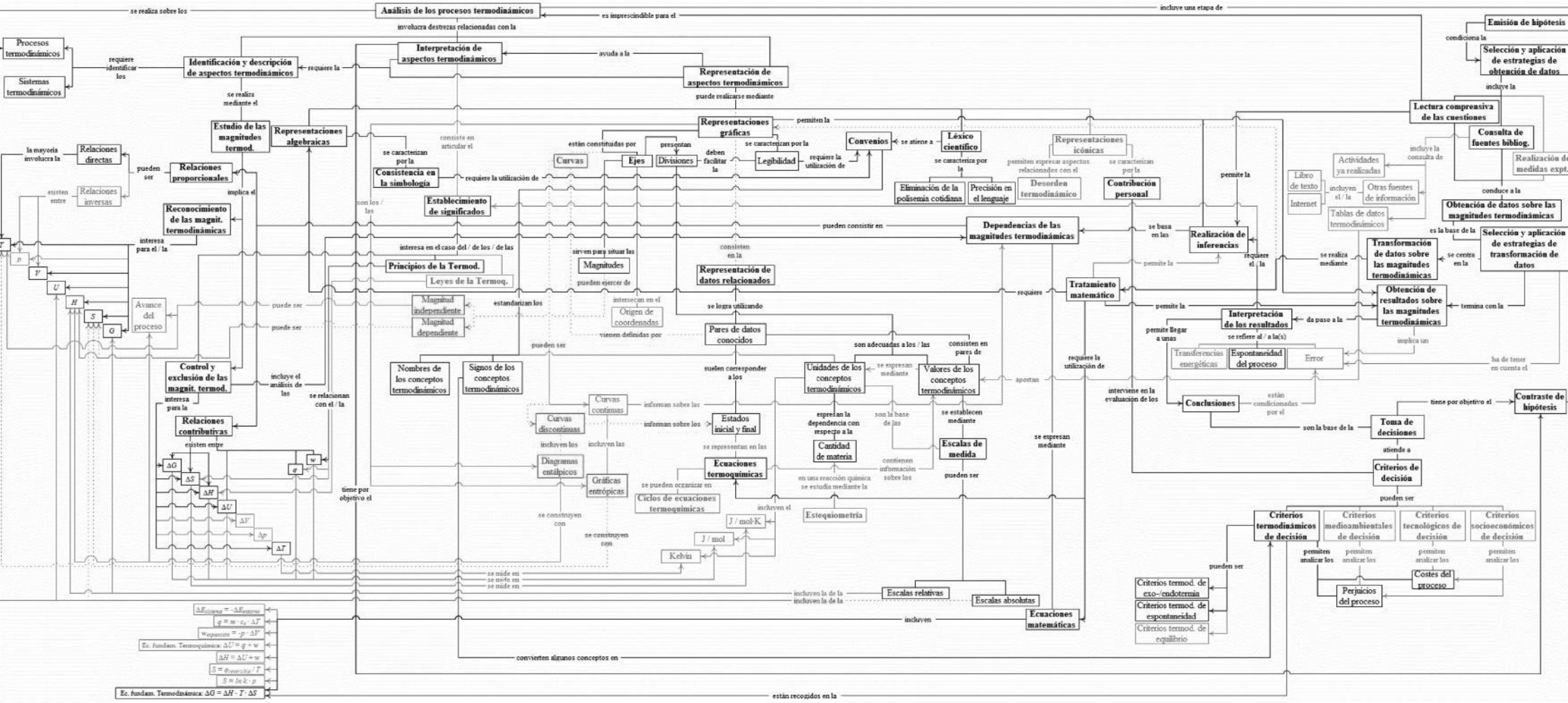
Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Clara

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*



Esquema idiosincrásico

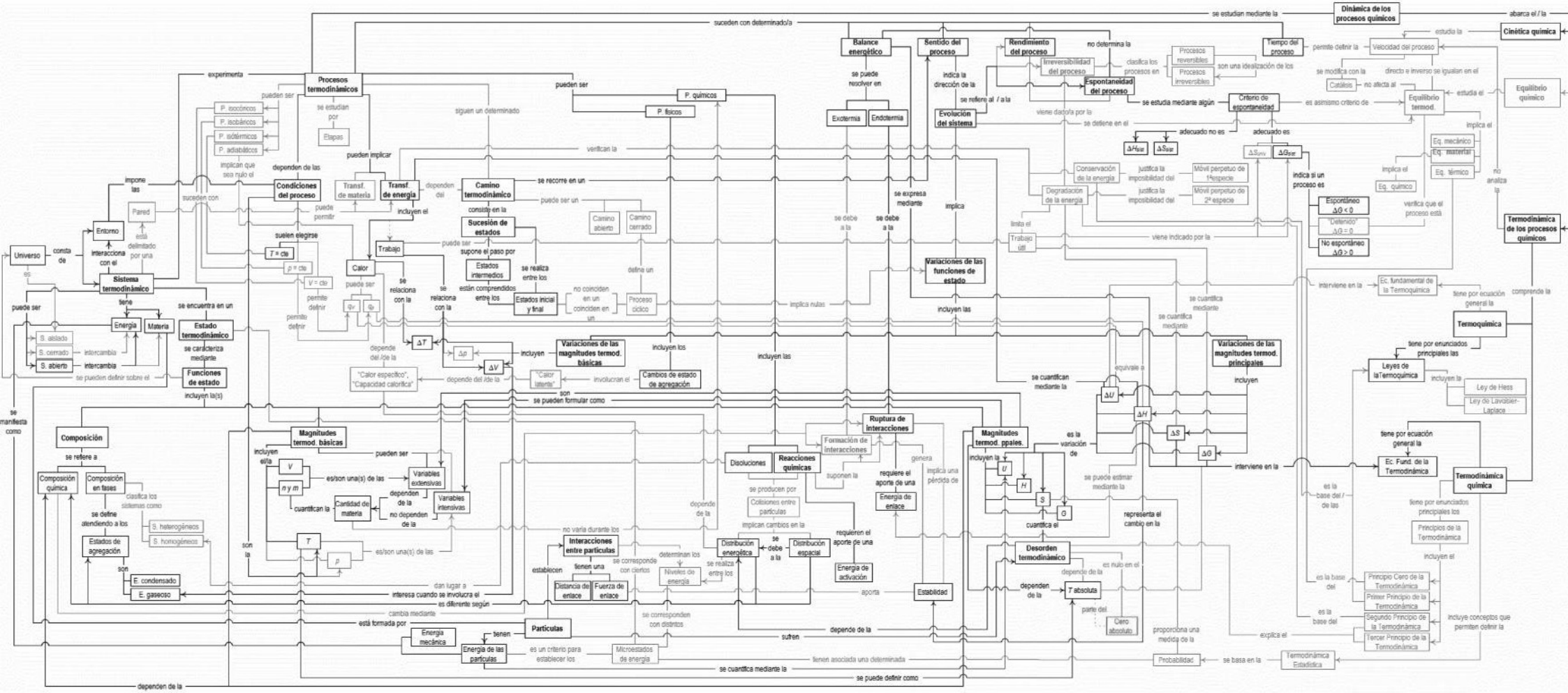
Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Darío

Momento del aprendizaje: caracterización final *(cf)*

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*



Esquema idiosincrásico

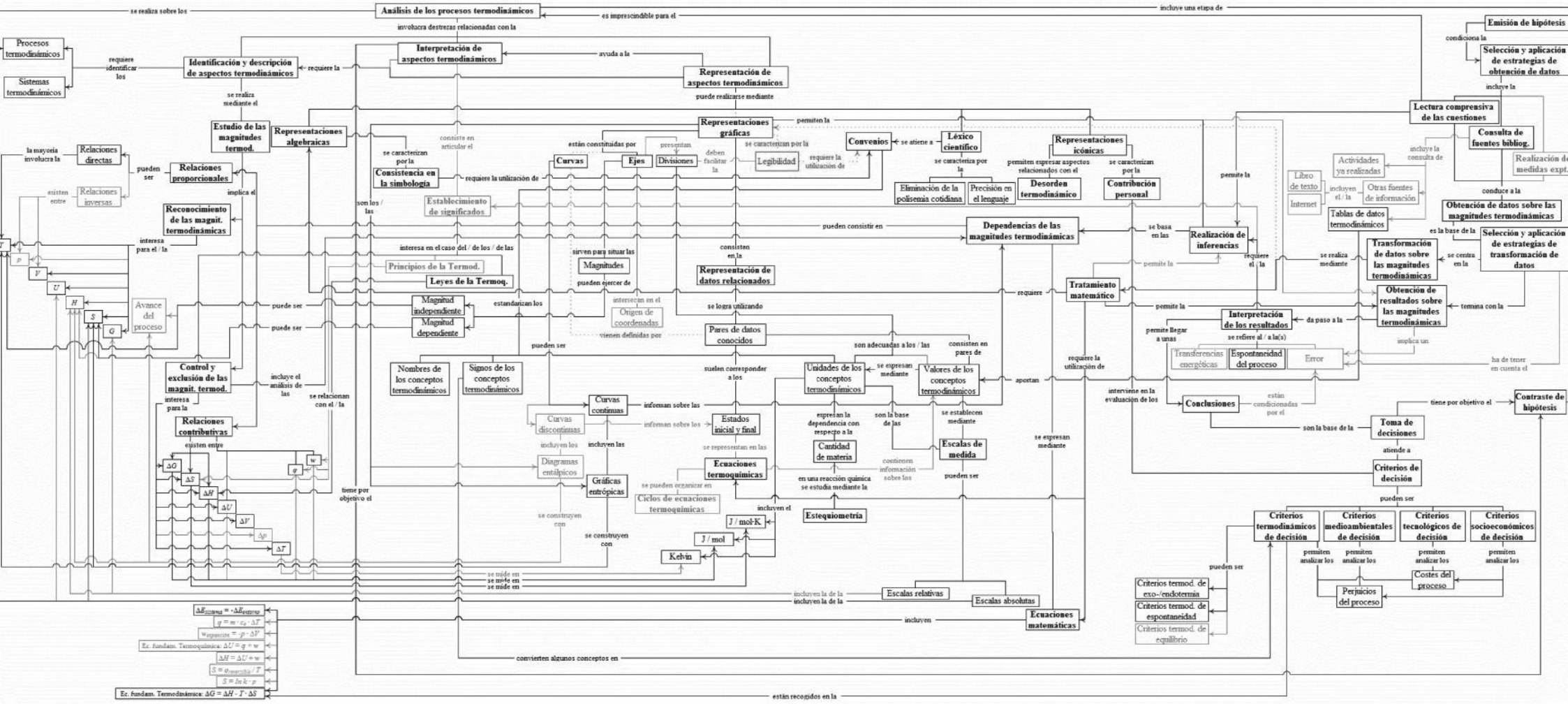
Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Darío

Momento del aprendizaje: caracterización final ***(cf)***

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*

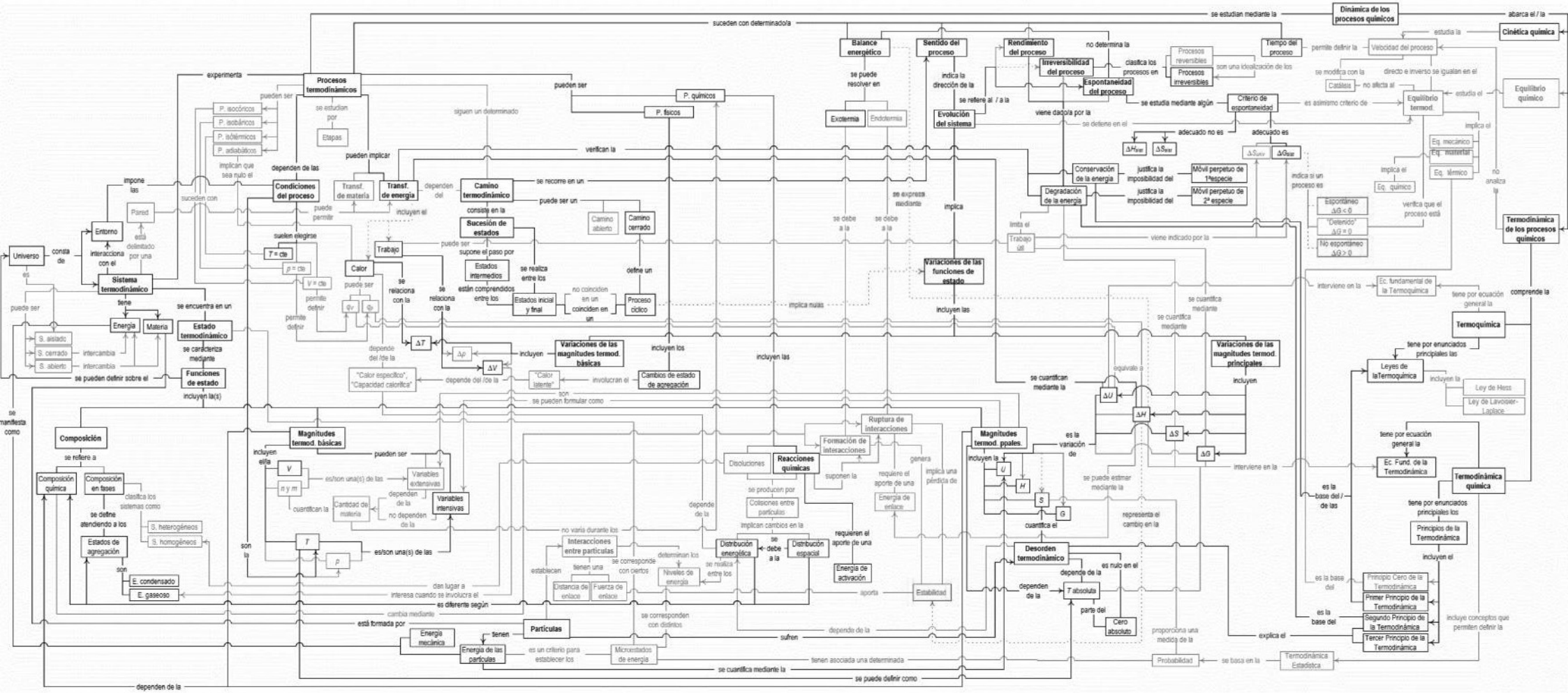


Esquema idiosincrásico

Termoquímica y Termodinámica Química ***(ERT)***

Alumno: Darío

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***


Leyenda
Relación activada y adecuada
Relación no activada
Relación inadecuada
Dinámica de los procesos químicos
Cinética química
Equilibrio químico
Termodinámica de los procesos químicos
Termoquímica
Termodinámica química
Procesos termodinámicos
Condiciones del proceso
Sistema termodinámico
Universo
Entorno
Pared
Estado termodinámico
Funciones de estado
Magnitudes termod. básicas
Magnitudes termod. principales
Magnitudes termod. ppales.
Variaciones de las magnitudes termod. básicas
Variaciones de las magnitudes termod. principales
Variaciones de las funciones de estado
Transf. de materia
Transf. de energía
Camino termodinámico
Sucesión de estados
Trabajo
Calor
Energía
Materia
Composición
Composición química
Composición en fases
Estados de agregación
Partículas
Energía mecánica
Energía de las partículas
Disoluciones
Reacciones químicas
Ruptura de interacciones
Formación de interacciones
Interacciones entre partículas
Distancia de enlace
Fuerza de enlace
Energía de enlace
Energía de activación
Colisiones entre partículas
Distribución energética
Distribución espacial
Niveles de energía
Microestados de energía
Balance energético
Sentido del proceso
Rendimiento del proceso
Irreversibilidad del proceso
Espontaneidad del proceso
Evolución del sistema
Exotermia
Endotermia
Procesos reversibles
Procesos irreversibles
Tiempo del proceso
Velocidad del proceso
Catálisis
Criterio de espontaneidad
Equilibrio termod.
Eq. mecánico
Eq. material
Eq. térmico
Eq. químico
Conservación de la energía
Degradación de la energía
Móvil perpetuo de 1ªespecie
Móvil perpetuo de 2ª especie
Espontáneo ΔG < 0
"Detenido" ΔG = 0
No espontáneo ΔG > 0
Ec. fundamental de la Termoquímica
Leyes de laTermoquímica
Ley de Hess
Ley de Lavoisier-Laplace
Ec. Fund. de la Termodinámica
Principios de la Termodinámica
Principio Cero de la Termodinámica
Primer Principio de la Termodinámica
Segundo Principio de la Termodinámica
Tercer Principio de la Termodinámica
Desorden termodinámico
Cero absoluto
Probabilidad
Termodinámica Estadística
P. isocóricos
P. isobáricos
P. isotérmicos
P. adiabáticos
P. químicos
P. físicos
Etapas
Camino abierto
Camino cerrado
Estados intermedios
Estados inicial y final
Proceso cíclico
S. aislado
S. cerrado
S. abierto
S. heterogéneos
S. homogéneos
E. condensado
E. gaseoso
Variables extensivas
Variables intensivas
Cantidad de materia
"Calor específico", "Capacidad calorífica"
"Calor latente"
Cambios de estado de agregación
se estudian mediante la
suceden con determinado/a
experimenta
pueden ser
se estudian por
siguen un determinado
verifican la
pueden implicar
dependen de las
impone las
suceden con
se recorre en un
puede ser un
consiste en la
se realiza entre los
supone el paso por
están comprendidos entre los
define un
suelen elegirse
T = cte
p = cte
V = cte
permite definir
se relaciona con la
incluyen el
se encuentra en un
se caracteriza mediante
se pueden definir sobre el
incluyen la(s)
se manifiesta como
se refiere a
clasifica los sistemas como
se define atendiendo a los
son
cuantifican la
es/son una(s) de las
dependen de la
no dependen de la
cambia mediante
está formada por
tienen
es un criterio para establecer los
se corresponden con distintos
se cuantifica mediante la
se puede definir como
dependen de la
incluyen las
incluyen los
se pueden formular como
implica nulas
se debe a la
se expresa mediante
implica
se refiere al / a la
se puede resolver en
indica la dirección de la
se puede estimar mediante la
se cuantifican mediante la
se cuantifica mediante
equivale a
es la variación de
representa el cambio en la
interviene en la
es la base del / de las
es la base del
proporciona una medida de la
explica el
se basa en la
tiene asociada una determinada
sufren
aporta
requieren el aporte de una
requiere el aporte de una
genera
implica una pérdida de
suponen la
se producen por
implican cambios en la
se debe a la
se realiza entre los
determinan los
se corresponde con ciertos
establecen
tienen una
no varía durante los
interesa cuando se involucra el
dan lugar a
es diferente según
depende de la
depende del /de la
involucran el
incluyen
incluyen
incluyen

Esquema idiosincrásico

Destrezas y estrategias en Termoquímica y Termodinámica Química ***(EAT)***

Alumno: Darío

Momento del aprendizaje: retención ***(Rt)***

Leyenda

- *Relación activada y adecuada*
- *Relación no activada*
- *Relación inadecuada*