

Hacia el autoabastecimiento energético

UNIVERSIDADE DE VERÁN 2011

Santiago de Compostela
12-15 de septiembre de 2011

Microgeneración distribuida
de energías térmica y eléctrica



EDICIÓN A CARGO DE
Manuel Bao Iglesias
Pastora M. Bello Bugallo

UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

publicacións

Hacia el autoabastecimiento energético

CURSOS E CONGRESOS
DA UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA
Nº. 208

Hacia el autoabastecimiento energético

Microgeneración distribuida de energías térmica y eléctrica

UNIVERSIDADE DE VERÁN 2011
Santiago de Compostela, 12-15 de septiembre de 2011

EDICIÓN A CARGO DE
Manuel Bao Iglesias
Pastora M. Bello Bugallo

2011
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

HACIA el autoabastecimiento energético : microgeneración distribuida de energías térmica y eléctrica : Universidade de Verán 2011, Santiago de Compostela, 12-15 de septiembre de 2011 / edición a cargo de Manuel Bao Iglesias, Pastora M. Bello Bugallo. – XII, 199 p. : il. cor. – (Cursos e congresos da Universidade de Santiago de Compostela ; 208). – Bibliograf. en cada cap. – ISBN 978-84-9887-747-2

1. Enerxías renovables. 2. Desenvolvemento sostible. 3. Enerxía solar. 4. Electricidade. I. Bao Iglesias, Manuel, ed. II. Bello Bugallo, Pastora M., ed. III. Universidade de Santiago de Compostela. Servizo de Publicacións e Intercambio de Publicaciones, ed. IV. Serie

620.9

© Universidade de Santiago de Compostela, 2011

Edita

Servizo de Publicacións e Intercambio Científico
Campus Vida
15782 Santiago de Compostela
www.usc.es/publicacions

ISBN 978-84-9887-747-2 (edición dixital .pdf)

Contenidos

Introducción a la microgeneración distribuida en el contexto energético actual

Manuel Bao Iglesias

Pastora M. Bello Bugallo

La USC en Transición: una apuesta por la resiliencia energética

Miguel Pardellas Santiago

Principios Bioclimáticos en la Arquitectura

Federico López Taetzel

Diseño bioclimático da vivenda en Galicia

Noela Vázquez Ledo, M. Carmen Taboada Gómez, Pastora Bello Bugallo

Introducción a las diferentes tecnologías de aprovechamiento de la energía solar directa

Rocío Mazón Hernández

Nuevos desarrollos en captación fotovoltaica

Ramón Ordás Badía

Energía solar concentrada para generación de potencia: estado de la técnica y aplicabilidad a diferentes escalas

Rubén Abbas Cámara

Integración Energética

José Antonio Souto González

Suministro energético en edificios: bombas de calor y microcogeneración

Pastora M. Bello Bugallo, Laura Cristóbal Andrade, Marta Galera

Martínez, Miguel A. Bernal Pampín

Aspectos termodinámicos de los motores de microcogeneración

Manuel Bao Iglesias

Microcogeneración: solución altamente eficiente para sistemas de calefacción y ACS en el sector terciario

Rafael Areso Goiricelaya

Pilas de combustible

Milagros Rey Porto

Aprovechamiento energético de residuos agroindustriales por codigestión anaerobia

Marta Carballa Arcos y Juan M. Lema Rodicio

Aspectos generales de la generación eólica

Antonio Sánchez Káiser

El futuro de la biomasa

Luis Ortíz Torres

**Introducción a la
microgeneración
distribuida en el contexto
energético actual**

II Hacia el autoabastecimiento energético

Según opinión generalizada, y admitida por sectores implicados en el tema (Empresas productoras del sector energético, y Administraciones de niveles diferentes), el futuro del sistema de abastecimiento energético se concibe como globalizado en el que desaparece la configuración actual de grandes productores que abastecen a un conjunto diversificado de consumidores.

El sistema del futuro se concibe como unas grandes redes de vehiculación de energía a las que se conectan productores y consumidores que aportan energía o la consumen pudiendo, en cada caso, ser productor o consumidor según sus propios requerimientos.

Como el balance total ha de resultar equilibrado y el sistema general de transporte ha de ser optimizado, los productores/consumidores de pequeña potencia deberán organizarse en redes menores (en electricidad de menor voltaje y en redes de calor locales) que, mediante mecanismos electrónicos de ajuste de voltaje, frecuencia y fase se conectan a las redes eléctricas de transporte que deberán disponer de sistemas de acumulación de energía (estaciones de bombeo etc.) , de sistemas de producción flexibles y de sistemas informatizados de regulación constituyendo las denominadas “ redes inteligentes”.

En un panorama como el sucintamente descrito, cualquier usuario actual puede ser productor de energías térmica y eléctrica conectado a unas redes menores (microredes) de energía eléctrica pura (minihidráulica, minieólica, fotovoltaica...) y/o a redes de calor (agua de temperatura media, 60 °C? ó aceites térmicos para temperaturas superiores). La conexión, a través de dispositivos automatizados permitirá la integración en la microred y, esta, también con puntos de conexión informatizados para operar con las condiciones impuestas por la red general verterá o absorberá, indistintamente, energía a, o desde, la red. Claramente la red térmica funcionará en entornos locales.

La tecnología para la construcción del esquema indicado está ya disponible con el único punto débil de la fiabilidad actual de los equipos de “electrónica de potencia” para los que se espera alcanzar los niveles de seguridad requeridos en poco tiempo.

En un plazo de meses, a nivel técnico, y de pocos años a nivel administrativo, se podrá generar energía eléctrica a nivel individual tanto en corriente alterna como en continua y, a través un equipo comercial adaptarla a las características de la microred local, el mismo equipo permitirá consumir energía eléctrica adaptada al consumo individual. En el equipo se integrarán medidores de energía de vertido a red y de consumo desde la misma. En el caso de cogeneración térmica y eléctrica, la microred térmica será independiente de la eléctrica. Periódicamente se verificarán saldos térmico y eléctrico y la correspondiente facturación.

La rápida visión del tema que hemos intentado transmitir permita intuir el extraordinario interés que toman los temas de microgeneración de energía, ya sea puramente eléctrica, puramente térmica y, más aún, la microcogeneración de energías térmica y eléctrica y, aunque el objetivo de este curso sea la formación (o inicio de la misma) de expertos en microgeneración, entendemos que el curso programado debe revisar los conceptos termodinámicos básicos, el uso de materiales y tecnologías disponibles y el

conocimiento de las proyecciones futuras en las distintas opciones como una preparación para poder tomar decisiones válidas sobre opciones viables y, al tiempo, indicar formas de producción actualmente no convencionales – o poco utilizadas- que, en el futuro ,podrían suponer aportaciones apreciables.

No podemos agradecer suficientemente la participación de Profesores cualificados y la colaboración de Empresas especializadas que se implican en la formación de futuros técnicos y que nos permiten una comprensión realística del estado del arte y que, sin duda, contribuyen y estimulan la concepción de nuevos procedimientos de producción y de nuevas aplicaciones para un uso más eficiente de las formas de energía disponibles.

Manuel Bao Iglesias

La sociedad en la que vivimos depende absolutamente de la energía, se necesita para todo, para las industrias, las viviendas, el transporte, etc. Y esta energía la necesitamos en distintas formas: térmica, eléctrica, luminosa, en forma de calor. Estas distintas formas de energía se obtienen a partir de energía primaria, que son recursos del entorno en el que vivimos caracterizados, entre otros factores, por una tasa natural de renovación. Y así tenemos distintos recursos energéticos naturales que se encuentran entre dos extremos del rango de renovación. En un extremo del rango se encuentran los recursos que se han formado hace millones de años y, por tanto, si se consumen o transforman se van agotando porque no se renuevan. Son los recursos no renovables y, en relación con la energía, los recursos energéticos no renovables incluyen los llamados combustibles fósiles, como son el carbón, el petróleo y el gas natural, y también el uranio que es la materia prima para la generación de energía en plantas nucleares. Hacia el otro extremo del rango se encuentran aquellos que se producen continuamente y no se agotan (fuentes inagotables de energía) como es el Sol, o el viento. Son los llamados recursos renovables y se pueden clasificar como radiación solar directa, recursos solares indirectos (biomasas, viento, cursos de agua y corrientes marinas, olas del océano), y otras fuentes (mareas, calor de la tierra).

A la hora de evaluar la sostenibilidad de los recursos llamados renovables debe considerarse su tasa de renovación y los impactos asociados a las tecnologías para su explotación. Pensemos por ejemplo en la biomasa para producir biocombustibles; este recurso, aunque está considerado como un recurso renovable, tiene una tasa de renovación intermedia, ya que para su crecimiento se necesita un terreno en condiciones; la explotación intensiva y sin control de este recurso puede dar lugar a problemas como empobrecimiento de la calidad del suelo, así como otros problemas sociales y ambientales, dado que compite con los alimentos y puede poner en riesgo ecosistemas milenarios. Además las tecnologías para su explotación y transporte necesitan de combustibles fósiles.

Volviendo a las formas en las que la sociedad obtiene la energía éstas han tenido una evolución en el tiempo. Durante la Revolución Industrial (tanto en la primera del año 1750 hasta 1840, como en la segunda de 1880 hasta 1914), el consumo de combustibles fósiles se fue haciendo cada vez más intensivo. En la primera revolución industrial la economía basada en el trabajo manual fue reemplazada por la industria, incluyendo los primeros usos del carbón en 1732, hasta la producción de electricidad en 1869. Aparece la máquina de vapor que es un motor de combustión externa que transforma la energía térmica del vapor de agua generada mediante combustión del carbón, en energía mecánica.

La segunda revolución industrial, que empieza desde la producción de electricidad en 1869 hasta el comienzo de la I Guerra Mundial en 1914, se caracteriza por el desarrollo de las industrias química, eléctrica, del petróleo y del acero. Es la época en la que se desarrolla el motor de combustión interna, que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible (normalmente derivado del petróleo) que se quema dentro de

una cámara de combustión. La combustión se produce dentro de la máquina a diferencia de la máquina de vapor.

Desde el final de la II Guerra Mundial (1945) hasta la actualidad estamos en la llamada tercera revolución industrial o revolución científico-técnica. Entre sus características destacan el aumento del consumo y el encarecimiento de los recursos naturales, entre ellos, los destinados a la producción energética.

Actualmente nos encontramos ante una sociedad que devora recursos naturales y, entre ellos, energéticos, basada todavía y sobre todo en combustibles fósiles. Se han utilizado ya las mejores de estas fuentes (mayor calidad, más fácil transformación, más poder calorífico, etc), se han desechado las fracciones de interés que antes no se valoraban.

Los problemas asociados a esta situación son, entre otros, el agotamiento de los recursos energéticos naturales así como disminución de su calidad, problemas de falta de seguridad en el suministro, contaminación ambiental producto de la transformación y uso de combustibles fósiles, así como contribución a problemas globales como el cambio climático. Se puede decir que se necesita hacer una gestión sostenible y óptima de los recursos energéticos incluyendo actuaciones tales como: aprovechamiento eficiente de fuentes de energía renovables; aumento de la eficiencia energética en la producción y el consumo, sobre todo en el caso de las tecnologías asociadas a los recursos fósiles; y un consumo más sostenible de la energía.

Las medidas que se han tomado en el ámbito de la Unión Europea incluyen el Libro Verde sobre seguridad del abastecimiento energético publicado en 2000, que incide en la necesidad de limitar la dependencia energética de la Unión Europea y de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Producto de esta política se publicaron varios textos legislativos y entre ellos las directivas siguientes: Directiva 2001/77/CE sobre la producción de electricidad mediante fuentes de energía renovables; Directiva 2002/91/CE sobre el ahorro energético en los edificios; Directiva 2003/30 relativa al fomento del uso de biocarburantes; Libro Blanco sobre la política de transportes; Directiva 2004/8/CE relativa al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía.

En España se han desarrollado actuaciones en el marco del “Plan de Energías Renovables (PER) 2005 – 2010” y del “Plan de Plan de Energías Renovables 2011-2020”, así como la “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004 – 2012”, que incluye dos planes de acción uno para el periodo 2005 - 2007, y otro del 2008 – 2012. Estas estrategias se aplican a los sectores de industria, transporte, edificios, servicios públicos, equipamiento residencial y ofimática, y agricultura.

El sector doméstico y de edificios en España representa más del 20% de la energía final y además tiende a incrementarse. Este consumo está asociado a sistemas de calefacción, refrigeración, cocción, lavado, ACS, ventilación, conservación de alimentos, iluminación y ofimática. La normativa en este ámbito procede de la trasposición de la Directiva 2002/91/CE sobre eficiencia energética en edificios y la Directiva 2006/32/CE sobre eficiencia del uso final de la energía y servicios energéticos. Entre las actuaciones que más afectan a este sector en el ámbito nacional destacan el Reglamento de

Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE); el Código técnico de edificación con sus documentos básicos incluyendo el DB HE sobre el Ahorro de Energía; y la Directiva de fomento de la cogeneración.

Para producir energía para el sector doméstico y edificios, los recursos energéticos pueden ser explotados en forma de micro-generación, es decir, producir energía a pequeña escala, cerca de los puntos de consumo. De este modo, se ahorra el transporte tanto de los combustibles como de la energía ya producida, más relacionada con la energía a gran escala. Además se pueden utilizar fuentes energéticas disponibles en el lugar, promoviendo la utilización de los recursos energéticos renovables junto con tecnologías de transformación y almacenamiento eficientes y sostenibles.

Pastora M. Bello Bugallo

La USC en Transición: una apuesta por la resiliencia energética

Miguel Pardellas Santiago

*Grupo de Investigación SEPA (Pedagogía Social e Educación Ambiental)
Departamento de Teoría e Historia da Educación. USC
Miembro del equipo de trabajo del Programa USC en Transición*

No es que falten estrategias de sostenibilidad. Lo que nos detiene es que no aceptamos intelectual y emocionalmente que la humanidad es materialmente dependiente de la naturaleza, y que la capacidad de producción de la naturaleza es limitada.
Mathis Wackernagel y William Rees (Nuestra Huella Ecológica – Reduciendo el impacto humano sobre la tierra).

1 ¿Un crecimiento infinito en un planeta finito?

En marzo de 1972, el denominado Club de Roma¹ publicó el informe *The Limits to Growth*, un trabajo desarrollado por un equipo multidisciplinar e internacional encabezado por Denis y Donella Meadows en el que se evaluaba la actual situación del planeta y se vaticinaba su evolución en base a un complejo modelo matemático.

¹ El Club de Roma (*The Club of Rome*) es una organización formada por prominentes personalidades, que, preocupados por los problemas de civilización identificados en sus estudios e informes, busca implementar nuevas formas de relación entre humanos y con la naturaleza. El Club de Roma tiene, entre sus miembros a importantes científicos (algunos premios Nobel), economistas, políticos, jefes de estado, e incluso asociaciones internacionales.

2 Hacia el autoabastecimiento energético

La relevancia de este informe radica en que se trata de la primera vez en la que un trabajo de investigación “académico” pone sobre la mesa la imposibilidad del crecimiento infinito dentro de una biosfera finita: en el capítulo inicial, titulado “El carácter exponencial del crecimiento”, los autores afirman que *“Desde el momento en que se abordan los problemas relativos a las actividades humanas, nos hallamos en presencia de fenómenos de naturaleza exponencial. Los cinco parámetros fundamentales del estudio que sigue (población, producción de alimentos, industrialización, contaminación y utilización de los recursos naturales no renovables) evolucionan según una progresión geométrica. La práctica totalidad de las actividades humanas –ya se trate del desarrollo de centros urbanos o del consumo de abonos–, obedece a esta ley”* (en Riechmann, 2004: 81). Como compatibilizar entonces un crecimiento exponencial dentro de un sistema complejo y cerrado como el planeta tierra?

Desde un punto de vista energético, esta hipótesis resulta en un oxímoron termodinámico y, sin embargo, nuestra sociedad y el actual modelo de producción y consumo parecen querer ignorar este hecho. Reiterando lo recogido en el informe sobre los límites del crecimiento, si algo caracteriza a la historia reciente de la humanidad es el crecimiento exponencial del consumo de energía; siendo necesario añadir a continuación un importante detalle: es a partir de la utilización de los combustibles fósiles como fuente principal de energía cuando entramos en el actual bucle en el que cada nueva generación consume más energía que la anterior.

La utilización de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, desplazaron el centro de gravedad económico, social y ambiental de las comunidades humanas desde una base renovable, la fotosíntesis de las plantas y la energía solar, hacia una no renovable, en un proceso de dependencia creciente de la energía fósil. Tomando como referencia los datos recompilados por el profesor Carlos Taibo (2009), los combustibles fósiles corren hoy a cargo de un 79,5% de la energía que se consume, correspondiendo un 35% al petróleo, un 23,3% al carbón y un 21,2% al gas natural; el resto se reparte entre combustibles renovables y residuos (un 10,9%), la energía nuclear (un 6,9%), la hidráulica (un 2,2%) y otras fuentes de energía renovables. A su vez, la propia electricidad depende también de los combustibles fósiles: en 2002, el 64,4% de aquella se obtenía de estos, frente a un 16,6% del uranio, un 17% de las centrales hidroeléctricas y un 1,9% de las fuentes de energía renovables. Pero esto no es todo...

Y es que si los combustibles fósiles, en general, se han convertido en el plato esencial de nuestras economías, el petróleo constituye el ingrediente principal: la agricultura necesita del petróleo para la tracción motora, pero también para la fabricación de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, empleados masivamente en el modelo de producción de alimentos basado en el monocultivo. Todo el sistema de transporte orbita alrededor del petróleo. La industria textil emplea derivados del petróleo en la elaboración de innumerables tejidos y fibras. La industria médica y farmacéutica depende también substancialmente de derivados de hidrocarburos, así como la industria militar y otros cientos de objetos y productos de uso cotidiano.

Ramón Fernández Durán (2008) habla de la primera parte de una Era del Petróleo caracterizada por una movilidad motorizada, urbanización acelerada y dispersa, turismo de masas intercontinental, agricultura industrializada, globalización de la producción y del consumo, desarrollo incontrolado de la minería a cielo abierto; una era que ha durado unos 150 años en los que la población mundial ha podido sextuplicarse y la población urbana se ha multiplicado por más de 50. Un crecimiento sin parangón en términos históricos que no hubiera sido posible sin el grifo abierto del oro negro.

Una dependencia de esta magnitud convierte el agotamiento de los combustibles fósiles, y del petróleo en particular, en un problema mayor, más aún si el aumento de la demanda sigue en una escalada, otra vez, exponencial.

2 El pico del petróleo

A mediados de los años 50, M. Hubbert, un geofísico estadounidense con una larga trayectoria en el estudio de la corteza terrestre y la explotación de pozos petrolíferos –trabajó para la petrolera Shell durante 20 años–, creó un modelo matemático que predice el nivel de extracción del petróleo a lo largo del tiempo. Según el mismo, la producción de petróleo de una reserva experimenta una evolución descrita por una campana de Gauss, alcanzando su máximo cuando la mitad del petróleo ha sido extraído y a continuación decayendo. Llegados a este punto, cada barril de petróleo se hace, progresivamente, más caro de extraer hasta que la producción deja de ser rentable al necesitarse gastar más cantidad de crudo que el se obtiene para extraerlo.

Tomando la producción pasada de crudo y, salvo que ocurran factores anómalos, como un acusado descenso en la demanda, el modelo predice la fecha del punto de máxima producción de un campo petrolífero o, por extensión, para una región, un país, o el conjunto del planeta. El máximo de extracción sería el “pico”, a partir del que entraríamos en la fase de agotamiento.

El Oil Depletion Analysis Center situó el pico del petróleo mundial en el año 2007, Colin Campbell y Chris Skrebowsky en 2010, y Jean Laherre en 2015 (en Zarzuela, 2009). Hemos superado el pico del petróleo, o lo haremos en breve, es el fin del petróleo barato y abundante que alimenta nuestras economías? Son muchas las voces que responden afirmativamente a esta pregunta y sus consecuencias no resultan alentadoras: Colin Campbell afirma que el pico del petróleo es un punto y aparte en la Historia de la Humanidad, de una magnitud sin precedentes, desde el momento en que nunca un recurso natural de tan crucial trascendencia social como el petróleo, ha encarado su declive por simple agotamiento, sin perspectivas de encontrar un sustituto mejor (en Hopkins, 2008). Ramón Fernández Durán (2011) habla de una ruptura histórica total que marca el comienzo de la segunda parte de la Era del Petróleo, afectando a todo el funcionamiento del aparato productivo industrializado (y de servicios) y las dinámicas de transporte y territoriales.

Evidentemente, existen también opiniones discordantes que niegan la inminencia del pico del petróleo o, de producirse, su efecto sobre nuestras sociedades. Las cifras manejadas para el cálculo del pico del petróleo constituyen uno de estos “puntos calientes”: el modelo matemático de Hubbert emplea en su cálculo la cantidad de crudo extraída, las reservas potencialmente existentes y la valoración de su demanda, y tanto las estimaciones relativas a las reservas existentes como a su demanda son muy dispares; no obstante, lejos de pretender tomar parte en esta guerra estadística, lo cierto es que en los últimos años el descubrimiento de nuevos yacimientos parece haberse frenado, al tiempo que la demanda ha seguido aumentando (Taibo, 2009).

No existe, por otra parte, ningún sustituto creíble del petróleo. La posibilidad de emplear otros combustibles fósiles u otras fuentes energéticas como la nuclear, los biocombustibles o las renovables resulta imposible de mantenerse la demanda actual: el rendimiento neto resultante es muy inferior al que se obtiene con el petróleo accesible, ya que a la energía que producen hay que restarle la necesaria para la fabricación, puesta en producción, transporte, almacenamiento o procesamiento (Zarzuela, 2009); el petróleo supone un muy importante subsidio energético también para conseguir otras fuentes de energía (carbón, gas, hidroeléctrica, renovables, nuclear), abaratando el coste de todas ellas y sirviendo además de combustible para el transporte de todo tipo de materiales y minerales; pero, sobre todo, porque también el carbón, el gas e incluso el uranio necesario para la industria nuclear están alcanzando sus picos de extracción (Heinberg, 2003).

2.1 La opción tecnológica

En los últimos 200 años la fe en el conocimiento humano y la confianza en las bondades de un futuro tecnológico han estado permanentemente en el imaginario colectivo de la humanidad como tabla de salvación a los problemas, puntuales o de mayor magnitud, que resultaban del desarrollo industrial y sus consecuencias. Especialmente en los pasados 30 años, el período de desarrollo y crecimiento de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación ha hecho posible importantes avances en todos los campos, sólo comparables con los impactos negativos paralelos a los que han ido asociados.

Llegado este punto, cabría preguntarse por la capacidad de la tecnología para enfrentar el pico del petróleo y sus impactos sobre nuestras sociedades, destacando en respuesta a esta pregunta las alternativas más frecuentemente presentadas: la apuesta por la energía nuclear, la confianza en la eficiencia energética y de materiales, y la competencia en el desarrollo de las energías renovables.

En primer lugar, la energía nuclear ha adquirido en los últimos años un renovado protagonismo como alternativa energética a uno de los problemas asociados al uso, y agotamiento, de los combustibles fósiles: el cambio climático (del que hablaremos más adelante). La aparentemente limitada emisión de gases de efecto invernadero, así como su “constancia” en la producción han sido los argumentos contrapuestos a los tradicionalmente

empleados por el movimiento ecologista y ambientalista, centrados en los residuos nucleares y la seguridad de las centrales. El reciente accidente de la central nuclear japonesa de Fukushima y la ausencia de una solución mejor al almacenamiento de los residuos radioactivos sirven como corolario explicativo al que, además, podríamos sumar otros motivos frontalmente opuestos a su opción como alternativa. El uranio es un recurso también limitado y su pico de extracción parece no estar demasiado lejos. Así mismo, no podemos olvidar que las centrales nucleares emplean cantidades ingentes de electricidad, tanto en la construcción de los reactores como en el tratamiento de los residuos y el sellado posterior de las infraestructuras, lo que nos remite nuevamente a la dependencia del petróleo y sus consecuencias.

Directamente ligada a las manifestaciones pronucleares, con la eterna promesa de la fusión nuclear o los reactores de nueva generación, aparece también como solución la eficiencia tecnológica, máxima aspiración hoy en día de numerosas organizaciones y empresas. A este respecto y tal y como afirma Francisco Heras (2003), se observa un consenso social cada vez más amplio para desterrar las tecnologías obsoletas, máxime cuando ya contamos con soluciones tecnológicas más eficientes e incluso más baratas. Sin embargo, el incremento de la eficiencia con que se utiliza un recurso no siempre se traduce en una disminución de la presión sobre los recursos naturales o en ahorros netos globales, pudiendo incluso producirse un “efecto rebote”, o “paradoja de Jevons”², de forma que el propio aumento de la eficiencia en el uso de un recurso puede contribuir al aumento de su consumo global (Heras, 2009). Latouche (2008) considera sin bagajes que las tecnologías eficientes incitan actualmente a un aumento del consumo, bien porque el aumento de la eficiencia puede ser liberar recursos para un nuevo uso, bien porque a nivel individual realizamos un ejercicio de compensación –utilizando bombillas de bajo consumo nos ofrecemos un extra en forma de viaje a las Antillas–, o bien porque, en realidad, la eficiencia tecnológica se concentra en los países del Norte, deslocalizando los procesos productivos más ávidos de recursos y energía a los países del Sur.

Directamente relacionado con el desarrollo tecnológico tenemos la opción de las energías renovables, aparentemente, una opción nada trivial si queremos resolver muchos de nuestros problemas energéticos; sin embargo, no podemos dejar de considerar algunos aspectos nada desdeñables. En primer lugar, es necesario destacar la reiterada dependencia de este tipo de energías del petróleo, especialmente en la construcción de sus instalaciones; así mismo, no podemos olvidar los impactos sociales y ambientales que, con el modelo de energías renovables actual, causan las infraestructuras asociadas y sus redes de distribución; aunque, sin duda, la gran duda reside en dar respuesta a las necesidades energéticas crecientes que caracterizan a nuestro modelo de producción y consumo, una vez que, aunque renovables, las energías así caracterizadas no son ilimitadas: no podemos utilizar toda la energía solar que llega a la tierra, igual que no podemos aprovechar todo el

² A finales del siglo XIX, el economista neoclásico William Stanley Jevons había notado que las calderas de vapor iban consumiendo cada vez menos carbón gracias a los perfeccionamientos técnicos, pero que el consumo global iba aumentando por el aumento de éstas.

viento o todo el agua que fluye por los ríos. Atender a los miopes planteamientos que inciden en el agua de los ríos que se “pierde” en sus desembocaduras o los montes “desaprovechados” por carecer de aerogeneradores es olvidar sus otras muchas funciones ecológicas (Herrero, Cembranos y Pascual, 2011).

Es necesario recordar que el pico del petróleo no significa que vayamos a quedarnos inmediatamente sin este recurso –siempre quedará petróleo en el subsuelo que será demasiado costoso extraer–, lo que nos ofrecería un cierto margen de maniobra para desarrollar una tecnología acorde a un potencial escenario futuro escaso de combustibles fósiles. Sin embargo, la actualidad resulta contradictoriamente preocupante: en lugar de asumir los límites de la biosfera y sus recursos energéticos, los paradigmas económico, social y tecnológico dominantes no han dejado de insistir en la idea de un crecimiento ilimitado.

2.2 Los otros vértices del triángulo...

Como no podría ser de otro modo, la crisis energética que acompaña el pico del petróleo se ve enmarcada en una crisis ambiental de mayor magnitud, activando y profundizando a su vez, las otras dos dimensiones que podríamos destacar: el Cambio Climático en marcha y el Colapso Ecológico mundial (Fernández Durán, 2011).

Dentro del Cambio Climático incluimos todos los impactos relacionados con la acumulación de gases de efecto invernadero de origen antropogénico y sus efectos sobre las condiciones climáticas, tanto en el plano ecológico como social. Su visibilidad social y mediática ha alcanzado importantes cotas en los últimos años, existiendo una extensa documentación sobre el tema. No ocurre lo mismo, sin embargo, con el denominado Colapso Ecológico, entendiéndolo como tal la sinergia de los desequilibrios ecológicos provocados por el hombre: la crisis de la biodiversidad, considerada ya como la sexta extinción mundial de especies; la pérdida de productividad del suelo y la consecuente crisis alimentaria; la contaminación de suelos y aguas resultado del metabolismo urbano, agrícola e industrial; la saturación de residuos, etc.

Tomando nuevamente las palabras de Fernández Durán (2011), Crisis Energética, Cambio Climático y Colapso Ecológico están íntimamente relacionados y se configuran como un triángulo extremadamente pernicioso para el futuro de la Humanidad y del Planeta Tierra. Sin ánimo de resultar catastrofista, Jorge Riechmann (2004: 91) lo expone claramente: *“El período de intenso crecimiento material, de carácter exponencial, resultará ser una anomalía histórica de carácter transitorio, a la que el choque contra los límites de la biosfera pondrá fin por las buenas... o por las malas”*.

Ante esta perspectiva, surge necesariamente la pregunta, ¿qué hacer?

Por supuesto, podemos seguir confiando en la aparición de una solución tecnológica que nos permita ampliar los límites de la biosfera o subvertir las leyes de la física (!); incluso confiar en la posibilidad de una salida “espacial”, colonizando otros planetas de los que poder seguir extrayendo recursos. Si bien, como afirma Latouche (2008: 49) *“Tener una fe ciega en la*

ciencia y el futuro para resolver los problemas del presente no sólo va contra el principio de precaución, sino sencillamente contra la sensatez”.

Durante siglos, la humanidad ha sabido adaptar sus actividades a los ritmos naturales y a las características del territorio. Sería recomendable que retomáramos la conciencia sobre los límites de la biosfera y transitar consecuentemente hacia sociedades con menores necesidades energéticas.

3 movimiento por la transición Las iniciativas o comunidades en transición son un movimiento iniciado en Kinsale, Irlanda, y luego extendida a Totnes, Inglaterra, por el ambientalista Rob Hopkins a comienzos del año 2005. Su objetivo: construir, mediante una metodología participativa, procesos impulsados por la sociedad civil para encarar seriamente los problemas paralelos del Cambio Climático y el Pico del Petróleo (Suriñach, 2008).

Ante la inminente llegada de los cambios que acompañaran estos acontecimientos, la propuesta del modelo de transición es hacer más fuertes a las comunidades locales (barrios, pueblos, ciudades), desarrollando su sentimiento de comunidad y reduciendo su dependencia energética; aumentar su resiliencia³. En palabras del propio Hopkins (en Scotti, 2008: 41): *“Una iniciativa en Transición es una comunidad que está dando rienda suelta a su genio colectivo latente, para mirar al Pico del Petróleo y el Cambio Climático directamente a los ojos y descubrir e implementar maneras de responder a la gran pregunta: ¿Cómo reducir drásticamente las emisiones de carbono (para mitigar los efectos del Cambio Climático) y como hacer aumentar de manera significativa la capacidad de recuperación/reacción (para mitigar los efectos del Pico de Producción del Petróleo) para todos aquellos aspectos de la vida que una comunidad tiene que tener en cuenta para sostenerse y prosperar?”.*

Partiendo de esta reflexión, la metodología propuesta desde la Red de Transición (una organización asistencial basada en el trabajo pionero de las primeras experiencias desarrolladas en Kinsale, Totnes y otros lugares precursores del modelo de transición iniciado por Hopkins), destaca la necesidad de reconocer cuatro puntos para la puesta en marcha de una iniciativa en transición (en Del Río, 2011):

- que la vida con un descenso dramático del consumo energético es inevitable y, por tanto, mejor prevenir que ser cogido por sorpresa.
- que la falta de resiliencia social actual hace que en estos momentos nuestras comunidades no estén preparadas para afrontar los choques que provocará el pico de producción del petróleo.
- que debemos actuar colectivamente y debemos hacerlo ahora.
- y que dando rienda suelta a la creatividad de la comunidad podemos proactivamente diseñar nuestro descenso energético y construir modos

³ La resiliencia es un concepto que proviene de la ecología y significa “la capacidad de un ecosistema de recuperar la estabilidad al ser afectado por una perturbación.

de vida más interrelacionados y ricos que reconozcan los límites físicos de nuestro planeta

Estos elementos constituyen el punto de inicio de un proceso⁴ que nos lleva a la elaboración de un Plan para el Declive Energético (el EDAP) para nuestra comunidad; un documento que constituye un punto y seguido en el desarrollo de la iniciativa, una vez que, como proceso colectivo con la aspiración de permanecer en el tiempo, una iniciativa en transición no cuenta con un punto y final reconocido.

3.1 Ingredientes para el cambio

El Modelo de Transición propuesto por Hopkins y colaboradores constituye un conjunto disperso de prácticas y principios del mundo real que se han ido construyendo a lo largo del tiempo a través de la observación y la experimentación de comunidades que crearon resiliencia local y redujeron las emisiones de carbono (Brangwyn y Hopkins, 2009).

Evidentemente, este modelo comparte muchos de sus objetivos y prácticas con otras propuestas también encaminadas a la búsqueda de soluciones a la crisis ambiental (el movimiento por el decrecimiento, las Post Carbon Cities, el Slow movement, etc.). Por este motivo, y sin que sean aspectos exclusivos de las iniciativas en transición, podemos destacar los siguientes elementos:

La comunidad como base. En palabras de Antonio Scotti (2008: 41), el modelo de las comunidades en transición “*es un ejemplo real y concreto de cómo pensar globalmente y actuar localmente [...], en cuanto se intenta encontrar soluciones allí donde la mayoría de la gente vive y seguirá viviendo, con mucha probabilidad durante lo que queda de siglo: en los grandes y pequeños núcleos urbanos*”.

La participación como método. Todo proceso participativo es también un proceso educativo en el que la toma de decisiones sobre situaciones y aspectos cotidianos obliga a integrar cuestiones que, de otra manera pasarían desapercibidas. Así mismo, participando en nuestra comunidad, afianzaremos los lazos con nuestros vecinos y vecinas, recuperando así redes de solidaridad y cuidados que caracterizaron históricamente a las comunidades humanas.

Visibilizando el futuro en positivo. Son varios los autores (Suriñach, 2008; Zarzuela, 2009; Del Río, 2011) que inciden en la importancia de realizar un ejercicio de visualización del futuro en positivo. Frente a otras perspectivas que destacan el carácter catastrófico de la crisis ambiental, las iniciativas en transición proponen mirar positivamente a nuestras comunidades futuras con una baja dependencia energética y una cohesión social satisfactoria y saludable para sus habitantes. Este enfoque psicopedagógico bebe en buena

⁴ En el modelo propuesto por la Red en Transición se sugieren 12 pasos para la puesta en marcha de una iniciativa en transición en una ciudad/pueblo/barrio: 1) Formar un grupo dirigente y planificar su dimisión desde el comienzo, 2) Tomar y crear conciencia, 3) Sentar las bases, 4) Organizar un gran lanzamiento, 5) Crear grupos de trabajo, 6) Utilizar la metodología de los Open Space, 7) Desarrollar manifestaciones prácticas y visibles del proyecto, 8) Facilitar la “Gran Capacitación”, 9) Tender puentes con las autoridades locales, 10) Honrar a los mayores, 11) No forzar los resultados, 12) Elaborar un Plan de Descenso de Energía (Brangwyn y Hopkins, 2009)

parte de la filosofía de la Psicología de las Adicciones del Dr. Chris Johnstone, estableciendo una estrecha similitud entre las drogodependencias y la adicción al petróleo.

Actuando desde el principio. Desde la Red de Transición se hace un especial hincapié en la necesidad de desarrollar manifestaciones prácticas y visibles del proyecto desde el primer momento, mejorando así la opinión de las demás personas sobre la iniciativa y también sus ganas de participar en ella. Crear huertos urbanos, plantar árboles productivos, organizar talleres de costura, hacer conservas o mermeladas en grupo, etc. son algunas de las acciones que se pueden encontrar.

Una visión sistémica de la realidad. El hecho de que cada una de las acciones desarrolladas, así como los debates y temas de discusión de los grupos de trabajo tengan como objetivo común la elaboración e implementación del Plan de Descenso Energético proporciona a las iniciativas en transición una visión sistémica de la realidad; visión necesaria para entender e interiorizar a su vez los problemas del Cambio Climático y el Pico del Petróleo.

Una apuesta por la integración. Javier Zarzuela (2009) define al movimiento en transición como un movimiento inclusivo, en donde todos los elementos de la comunidad son necesarios: las iniciativas ya en marcha pueden integrarse en la comunidad en transición; los colectivos y grupos ya consolidados pueden colaborar en las iniciativas; las autoridades locales pueden participar, que no controlar, en el proyecto; etc. El medio para el cambio no es la confrontación, sino la inclusión y la integración.

Es necesario destacar en este proceso de integración la importancia de contar activamente en el proyecto con “nuestros mayores”, no sólo por una cuestión asistencial y de apoyo comunitario, sino porque son ellos y ellas los que tienen una vivencia en modelos de vida con menor gasto energético.

Reinventando la eficiencia tecnológica. Las comunidades en transición no buscan romper abruptamente con el petróleo, sino ir poco a poco reduciendo su dependencia a través de la reelaboración de modelos de sociedad que consuman menos energía. Evidentemente, en este proceso no se rechaza ni el potencial de la eficiencia tecnológica ni de las energías renovables; pero sí se reinventan: la apuesta es por una tecnología y unas fuentes energéticas más simples, más comunitarias y más descentralizadas.

4 La USC en Transición

La USC, como entidad y como comunidad, está también expuesta a los vaivenes económicos, sociales y ambientales que identificaron, e identifican, las comunidades en transición en sus inicios: elevado consumo energético, dependencia económica, falta de cohesión interna, apatía comunitaria, etc.

En este contexto, no parece descabellado apostar por la puesta en marcha de una iniciativa en transición en el marco de la USC, aún asumiendo las importantes diferencias estructurales y organizativas respecto a una comunidad “tradicional”; no obstante, atendiendo a su definición, una comunidad es un grupo de individuos que comparten elementos en común, como costumbres, valores, tareas, ubicación geográfica, etc.

Tomando pues como base, los elementos característicos del movimiento en transición, surge el Programa USC en Transición, puesto en marcha por el Plan de Desarrollo Sostenible de la USC como el objetivo de dinamizar a la comunidad universitaria para promover modelos de vida más sostenibles que contribuyan a reducir su huella⁵ y deuda ecológica⁶ y aumentar así su resiliencia.

Así mismo, fueron adoptadas las siguientes ideas fuerza para el programa:

- el punto de partida: la universidad como contexto. La USC, con sus dos campus en Santiago y Lugo, constituye en una comunidad en sí misma; pero se trata de una comunidad con unas características particulares: su población es muy oscilante, las relaciones de poder están muy marcadas y la identificación como comunidad es muy discutible, entre otras cuestiones. Habilitar los mecanismos necesarios para adaptarse y poder desarrollar el programa teniendo en cuenta este contexto y las dinámicas propias de la universidad tendrá que ser una prioridad.
- creando comunidad: la participación como base. Sentirse parte de una comunidad tomando decisiones sobre como pueden hacerse las cosas para mejorar constituye un elemento imprescindible para romper las dinámicas de apatía y desmovilización patentes en la comunidad universitaria. Además, todo proceso participativo es también un proceso educativo y creativo en el que el conjunto de la comunidad aprende y enseña paralelamente con el objetivo de crear alternativas de mejora.
- Vasos comunicantes: la permeabilidad con la ciudad. Las ciudades de Santiago y Lugo son el “macrocontexto” en el que se desarrolla la comunidad USC. Las dos ciudades tienen sus propias iniciativas y dinámicas, pudiendo establecerse sinergias y puntos de encuentro que retroalimenten los procesos en marcha y sirvan a su vez de base para el desarrollo de nuevas iniciativas.

La articulación de “grupos en transición” que puedan desarrollar proyectos concretos de sostenibilidad (huertos en el campus, reutilización de ordenadores, bancos de tiempo, espacios de trueque, etc.) y la posibilidad de elaborar un Plan de Declive Energético para la USC diseñado de forma participativa constituyen los primeros pasos de un programa que aspira a “hacer transitar” a la universidad hacia otras formas de gestión más sostenibles y participativas.

⁵ Huella ecológica: área de territorio productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesarios para generar los recursos necesarios y además para asimilar los residuos producidos por cada población determinada de acuerdo a su modo de vida en específico, de forma indefinida (Wackernagel, M y Rees, W., 2001)

⁶ Deuda ecológica: es la deuda acumulada por los países del Norte frente a los países del Sur por el expolio de sus recursos, por los daños ambientales no reparados, por la ocupación gratuita o mal pagada de su espacio ambiental para depositar residuos, por las consecuencias que están sufriendo debido al cambio climático y otros contaminantes y por la pérdida de soberanía alimentaria (Alier, J.M., 2004)

La línea de trabajo por la que apuesta el Programa USC en Transición es la de establecer un marco, un objetivo común, en el que integrar y coordinar todas las actuaciones en materia de sostenibilidad que se desarrollan en la universidad. De este modo, tanto las acciones en infraestructuras – aislamientos, instalación de placas solares, iluminación eficiente, etc.–, como aquellas destinadas a promover modelos de vida más sostenibles –campañas informativas, actividades educativas, etc.–, se presentarán como elementos complementarios de una actuación común y colectiva. Una visión sistémica de la realidad universitaria en la que podrán tener cabida todas las propuestas y todas las personas y colectivos que quieran participar del reto que supone “repensar” la universidad para la transición.

Como no podría ser de otro modo, la gestión energética de la USC constituye uno de los principales focos de atención del programa, junto con la promoción de una identidad colectiva como comunidad universitaria. En este sentido, y reiterando lo ya expuesto, la apuesta excluyente e idealizada por una “solución tecnológica”, sin tener en cuenta los límites de la biosfera y las dinámicas y necesidades socioeconómicas, resulta insuficiente. Es necesario “repensar” la tecnología para hacerla más sencilla, equitativa y comunitaria, habilitando procesos participativos y estrategias educativo-ambientales que, como herramientas de transformación social contribuyan a una solución más eficaz de los problemas (Caride, J.A. y Meira, P.A., 2001; VVAA, 2005; Meira, P.A., 2006; Iglesias, L. y Pardellas, M. 2008).

Es la triangulación de Educación Ambiental, Participación de la comunidad universitaria y desarrollos tecnológicos acordes a los recursos y necesidades de la propia comunidad lo que puede contribuir a una mayor resiliencia energética de la USC, en particular, y de nuestras sociedades, en general; una transición que, con la continuidad en el tiempo que exigen los cambios lentos, vaya produciendo frutos progresivamente, generando nuevas dinámicas y nuevos procesos que, en su conjunto, contribuyan a una universidad y a una comunidad universitaria más sostenible, saludable y satisfactoria.

Referencias

- Alier, J.M. (2004). *El ecologismo de los pobres*. Icaria: Barcelona.
 Assotiation for the Study of Peak Oil and Gas (<http://www.peakoil.net>).
 Bermejo, R. (2008). *Un futuro sin petróleo. Colapsos y transformaciones socioeconómicas*. La Catarata: Madrid.
 Brangwyn, B. y Hopkins, R. (2009). *Compendio de iniciativas de transición* (www.transitiontowns.org)
 Caride J.A. y Meira, P. A. (2001). *Educación Ambiental y Desarrollo Humano*. Ariel: Barcelona.
 Del Río, J. (2011). “En transición hacia un nuevo paradigma. La complejidad del mundo y sus límites” en *The Ecologist*, núm. 45, pp. 15-18.
 Fernández Durán, R. (2008). *El crepúsculo de la era trágica del petróleo*. Ed. Virus y Ecologistas en Acción: Barcelona.

- Fernández Durán, R. (2011). *La Quiebra del Capitalismo Global: 2000-2030*. Libros en Acción: Madrid.
- Heinberg, R. (2003) *The Party's Over*. New Society Publishers: Gabriola Island. Canadá.
- Heras, F. (2003). "El inodoro como símbolo", en *Ambienta*, núm. 28, pp. 68-70.
- Heras, F. (2006). Heras, F. (2009). "Eficiencia tecnológica" en *Ecologista*, núm. 60, pp. 22-24.
- Herrero, Y., Cembranos, F. y Pascual, M. (coords.) (2011). *Cambiar las gafas para mirar el mundo*. Libros en Acción: Madrid
- Hopkins, R. (2008). *The Transition Handbook. From oil dependency to local resiliencie*. Green Books: Totnes.
- Iglesias, L. y Pardellas, M. (coords.) (2008). *Estratexias de Educación Ambiental. Modelos, experiencias e indicadores para a sostenibilidade local*. Eixo Atlántico do Noroeste Peninsular: Vigo.
- Latouche, S. (2008). *La apuesta por el decrecimiento*. Icaria: Barcelona.
- Mathis Wackernagel y William Rees (2001). *Nuestra huella ecológica – Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra*. LOM Ediciones/Instituto de Ecología Política: Santiago de Chile.
- Meadows, L. y Randers, J. (1992). *Más allá de los límites del crecimiento*. El País/Aguilar: Madrid.
- Meira, P.A. (2006). "Crisis ambiental y globalización: una lectura para educadores ambientales en un mundo insostenible", en *Trayectorias*, Año VIII, núm. 20-21, pp. 110-123.
- Movimiento de transición (<http://movimientotransicion.pbworks.com>).
- Naredo, J.M. (2006). *Raíces económicas del deterioro ecológico y social*. Siglo XXI: Madrid
- Riechmann, J. (2004). *Gente que no quiere viajar a Marte*. Los libros de la Catarata: Madrid
- Scotti, A. (2008). "Tiempos de Transición", en *EcoHabitar*, núm. 19, pp. 40-43.
- Semal, L. y Szuba, M. (2011). "Transición y Decrecimiento. Un camino común", en *The Ecologist*, núm. 45, pp. 19-22
- Sempere, Q. y Tello, E. (coords.) (2007). *El final de la Era del Petróleo Barato. Del final del Petróleo a la Transición Energética*. Icaria: Barcelona.
- Suriñach, R. (2008). "Volviendo a lo local", *Opciones*, núm.28, pp.27-29
- Taibo, C. (2009). *En defensa del decrecimiento*. Los Libros de La Catarata: Madrid.
- Transition Network (<http://www.transitionnetwork.org/>).
- USC (<http://www.usc.es/uscentransicion>).
- VVAA (2005). *Once historias sobre participación ambiental. Y algunas reflexiones compartidas*. Seminario sobre Educación Ambiental y Participación, Ministerio de Medio Ambiente – Organismo Autónomo de Parques Nacionales: Madrid.
- Zarzuola, J. (2009). "El movimiento de transición", en *Ecologista*, núm. 61, pp. 24-26.

Principios Bioclimáticos en la Arquitectura

Federico López Taetzel

Arquitecto

1 Introducción

El término “bioclimática” quiere expresar un tipo de edificación que ha sido diseñada con un interés y dedicación especial por los aspectos relativos al confort, la salud y el aprovechamiento de la energía natural mediante el diseño arquitectónico, en un intento de volver a pensar los edificios utilizando criterios que siempre le han pertenecido, basados en su adaptación al lugar y el respeto al medio ambiente.

Como señala Victor Olgyay en su libro - Arquitectura y Clima - “La adaptación de la edificación a su entorno ha representado un eterno problema durante siglos. Vitrubio le concedió gran importancia, al igual que Le Corbusier, quién **afirmaba** *‘La sinfonía del clima [...] no ha sido comprendida [...] La trayectoria del sol difiere de la curvatura de sus meridianos, la intensidad de su radiación, varía en la superficie de la tierra según su incidencia [...] En este tema existen numerosos condicionantes que precisan soluciones apropiadas. Es aquí, donde el regionalismo auténtico juega un papel muy importante’*”

A mediados del siglo XX, el desarrollo tecnológico y el empleo generalizado de combustibles derivados del petróleo generó la creencia de que no era necesario estar tan condicionado por la influencia del medio natural para el diseño de las viviendas y edificios, y que las condiciones de confort dentro de los edificios se podían conseguir mediante el uso de la

energía aportada por esos nuevos combustibles, tanto para calefacción como para refrigeración, difundiendo el uso del aire acondicionado. Comenzó entonces el alejamiento progresivo del uso de los criterios tradicionales, y se difundió la imagen de edificios con soluciones que se aplicaban tanto en un clima cálido como en uno frío, al precio de un incremento del uso de la energía necesaria para mantenerlos en condiciones de confort.

La falta de relación de estas edificaciones con las peculiaridades del lugar donde se construían, de adecuación al clima, de integración en el medioambiente, y de satisfacción del ‘ideal de habitar’ de los destinatarios de las viviendas, es coincidente con la crisis energética de mediados de la década del 70, generando un debate interdisciplinar y el surgimiento de nuevas propuestas, que en el campo de la arquitectura se expresaron con el término *arquitectura bioclimática*.

Como expone Jaime López Asiaín en su libro *Arquitectura-Ciudad y Medioambiente*:

¿Qué otra cosa es el enfoque bioclimático sino el esfuerzo por comprender un lugar, con sus condicionantes físicos y climáticos pero apropiándose también de los aspectos históricos, culturales y estéticos, para desarrollar en él la acción arquitectónica? ¿Qué otra cosa caracteriza al arquitecto preocupado por las situaciones ambientales, que actuar sobre microsistemas sin destruirlos?

Debemos entender que el compromiso con “una cultura” también implica el uso, a través del diseño arquitectónico, de los conocimientos y recursos energéticos naturales disponibles en el lugar, así como la utilización que resulte necesaria, de las nuevas tecnologías, para garantizar mediante su uso racional y responsable, el nivel de confort y bienestar requerido.

Cada época genera su propio ‘ideal de habitar’ como una exigencia ineludible, pero a partir de ese compromiso de diálogo con el lugar y su contexto cultural e histórico, surge la posibilidad de insertar una arquitectura más o menos recuperadora del pasado, que no lo dañe, sino que entronque con él y en él se diluya, o bien crear formas nuevas como resultado creativo de ese diálogo, enriqueciendo el lugar en el que se implanta.

La obras de rehabilitación de antiguas edificaciones, permiten operaciones de reconversión que respetando los elementos y formas preexistentes, las readaptan, e incorporan nuevos usos, procurando mayor confort y habitabilidad a la vez que conservan y ponen en valor espacios y elementos, como bodegas, alpendres, lareiras fallados, patios, pilares, etc., que tratados con esmero aportan su valor estético y simbólico, al nuevo espacio arquitectónico generado.

En el medio rural de Galicia es posible apreciar muchos ejemplos de antiguas viviendas, reconvertidas en restaurantes, hostales, o casas con encanto, muy valoradas por los usuarios, por estar integradas en el lugar, respetar el entorno y conservar las características constructivas propias de la región.

2 Criterios de diseño bioclimático

2.1 Observaciones previas

Vamos a utilizar como tipología de edificación para exponer estos criterios de diseño, la destinada a vivienda, por ser la que mayor incidencia tiene en la población, aquella que mejor conocemos y de la cual todos tenemos una experiencia concreta de uso.

Es necesario hacer una diferenciación entre los siguientes tipos de actuaciones:

- a) intervenciones en el medio rural, con viviendas unifamiliares aisladas
- b) intervenciones que se realizan en el medio urbano, con edificios de viviendas plurifamiliares en altura o en urbanizaciones con viviendas individuales.
- c) intervenciones a nivel de urbanismo y planificación.

Como veremos a continuación, las viviendas unifamiliares aisladas permiten una mayor posibilidad de intervención, porque se puede actuar sobre casi todos los factores que influyen en el diseño y que condicionan el resultado final.

En el caso de actuaciones en el medio urbano, hay factores que vienen definidos por la parcela sobre la que se va a actuar y que son inalterables, comprometiendo seriamente en algunos casos los resultados de la intervención. Por esta razón estas intervenciones están estrechamente condicionadas por las previsiones del planeamiento existente en la ciudad donde se va a construir, para poder aplicar correctamente los criterios bioclimáticos en el diseño de los edificios. En las zonas en que la trama urbana está consolidada, el tipo de intervención está muy limitado aun en el caso de obras de nueva planta, y más difícil aún en los casos de rehabilitación de edificios en desuso u obsoletos.

Considerando que hoy es en la ciudad donde se asienta mayoritariamente la población en progresivo aumento, es necesario que la incorporación de nuevas superficies del territorio como suelo edificable se realice previendo que esas intervenciones a nivel de urbanismo y planificación se hagan con criterios bioclimáticos, todavía minoritarios y en algunos casos inexistentes, que resultan imprescindibles para poder hacer de la ciudad, progresivamente, un lugar para habitar sostenible, con una mayor y más homogeneizada calidad de vida.

2.2 Condicionantes del proyecto

2.2.1 Acuerdos Básicos Iniciales

2.2.1.1 El encargo

El proyecto de una vivienda bioclimática es resultado, por lo general, de un encargo realizado por un promotor, normalmente una pareja, que construye para uso propio, y es el que determina los vínculos que se establecerán con el medio socio-cultural en el que se implantará, así como los recursos económicos disponibles para su construcción. Es la oportunidad de

informar e interesar al cliente de las características conceptuales y de uso de este tipo de viviendas. .

2.2.1.2 Características generales de la vivienda bioclimática

La vivienda utilizará energía pasiva, energía natural que pueda captar mediante el diseño arquitectónico, y contará para cubrir el déficit con equipos mecánicos, que funcionen con energía renovable, independizándose en lo posible de la energía derivada de combustibles fósiles.

Las condiciones de confort se establecen en un rango que evite el consumo innecesario o excesivo de energía, para ello el usuario deberá participar en el funcionamiento de la casa, activando los elementos que correspondan para alcanzar las condiciones de confort requeridas e interiorizándose de las características de uso de la energía pasiva.

2.2.2 El medio físico y ambiental-toma de datos e información

2.2.2.1 Equipamiento e infraestructuras

Se observará si en el entorno existe algún tipo de industria, urbanización, núcleo rural, o construcciones aisladas, analizando tipología y antigüedad.

Se comprobarán los medios de comunicación existentes, las infraestructuras y los servicios disponibles..

Se valorarán estos datos con el promotor antes de la compra de la parcela

2.2.2.2 Factores climáticos

Para la escala global, salvo los casos extremos, el planeta se considera dividido en cuatro regiones que en base a sus macrocaracterísticas se clasifican como: región fría, región templada, región cálida árida, región cálida húmeda.

Para la escala de la arquitectura nos debemos interesar además, del lugar y de sus microcaracterísticas ambientales, que vienen determinadas por:

- factores geográficos: latitud, hidrografía, topografía, altura, morfología del entorno y del terreno
- factores biológicos: flora (vegetación todo tipo, arbolado autóctono) y fauna

Del estudio de estos factores, obtenemos las características ambientales del lugar

2.2.2.3 Características Ambientales del Lugar - localización

Las características ambientales del lugar están interrelacionados y son los datos en base a los cuales vamos a tomar las decisiones de proyecto más convenientes para obtener el aprovechamiento pasivo de la energía natural que utilizará la vivienda.

Radiación solar - asoleamiento -

La dirección y el ángulo de incidencia de los rayos solares varía con la latitud del lugar, el mes y la hora, alcanzando para una latitud dada la altura

máxima sobre el horizonte en verano al medio día, en tanto que en invierno la altura sobre el horizonte es la mínima para la latitud considerada. El conocimiento de la dirección y el ángulo de incidencia de los rayos solares, las horas de asoleamiento, y la intensidad de la radiación es fundamental para poder diseñar los elementos de control de la radiación solar, factor clave del diseño bioclimático de la vivienda.

El tipo de radiación que se recibe del sol, se distribuye en una amplia zona del espectro electromagnético, entre ellas consideramos:

- radiaciones de onda corta, ultravioleta - llegan muy absorbidos por la atmósfera.
- radiaciones visibles, que son los de mayor intensidad.
- radiaciones de onda larga – infrarrojo.

La radiación recibida en una superficie determinada es el resultado de la radiación directa del sol, la radiación difusa del cielo, la radiación reflejada en el terreno.

Temperatura del aire

Es consecuencia de la incidencia del sol y depende fundamentalmente de la temperatura de las superficies que se calientan o enfrían al recibir o emitir radiación y que ceden calor al aire por convección.

La temperatura del aire se ve afectada por :

- la latitud: que influye sobre la masa atmosférica que debe atravesar el aire
- la altura : el aumento de la altura sobre el nivel del mar disminuye la temperatura en 0,5°C cada 100 m.
- la relación masa tierra-agua: condiciona la inercia térmica y las oscilaciones de temperatura
- la morfología del terreno: afecta de forma variable según la incidencia de la radiación (o imposibilidad de recibir radiación)
- existencia de vegetación: incrementa la inercia térmica, tendiendo a estabilizar la temperatura
- exposición a vientos: según el tipo de viento, favorecerá condiciones más o menos frías.
- variaciones cíclicas de tº: la temperatura experimentan variaciones que se repiten cíclicamente durante el día y a lo largo del año, oscilaciones con máximos y mínimos retardados respecto a los máximos y mínimos del asoleo.

Los climas más continentales y más desérticos son los que tienen más acusadas las oscilaciones de temperatura, en ciclo diario como estacional.

Humedad relativa

La humedad relativa expresa cual es el porcentaje existente de vapor de agua en el aire, referido al máximo que podría contener a esa temperatura.

Si la humedad específica es constante, toda variación de la temperatura comportará una variación de la humedad relativa, resultando mayor la humedad relativa de noche que de día, y en invierno que en verano.

Viento

El factor primario productor del viento es la existencia de masas de aire a diversas temperaturas y presión por efecto de la radiación solar.

El viento puede: afectar las características de temperatura, calentando o enfriando el ambiente; favorecer la ventilación y reducir la humedad; mejorar la calidad de la atmósfera, disminuyendo y dispersando la contaminación; reducir o incrementar ruidos locales

Los vientos son movimientos del aire que se producen para compensar las diferencias de presión del aire a distinta temperatura, derivadas de la desigual inercia térmica que tienen las masas del territorio sobre las que se encuentran.

Debido a la relación masa tierra-agua, la inercia más pequeña de la tierra hace que, por la mañana, el aire se caliente más rápidamente que el que se encuentra sobre el mar. El aire caliente, menos denso sube y es substituido por otro más denso y frío, el del mar, originándose la brisa marina de dirección mar-tierra. Al atardecer se produce el fenómeno inverso y se origina el viento de tierra-mar (terral). Este ciclo se reproduce cada día, y se da también en la relación campo-ciudad; desierto-bosque y en otra escala, entre el aire exterior menos caliente de una fachada norte (sin sol) y el aire caliente de la fachada sur (expuesta a la radiación) que atraviesa el interior de la vivienda, en verano.

Composición y pureza del aire - contaminación

Si bien no es propiamente un dato climático, por su importancia se lo tiene en cuenta en esta primera fase de análisis del medio en el que se pretende edificar.

El principal factor generador de la contaminación de la atmósfera es el dióxido de carbono derivado del uso de combustibles fósiles en la actividad humana, fundamentalmente en edificios residenciales y el transporte, afectando principalmente a los grandes núcleos urbanos, en los que también se producen otros fenómenos característicos como el smog, partículas contaminantes suspendidas en el aire que dificultan la radiación

En el medio rural se puede señalar la contaminación con gas metano como consecuencia de la explotación del ganado, o el óxido nitroso derivado del estiércol. A escala local se debe tener presente la posible contaminación del aire, verificando si existe algún tipo de instalación industrial contaminante en las proximidades, o bien servicios comunitarios como las depuradoras, y vertederos que según el viento, invaden con su olor las zonas próximas

Precipitaciones

En general se considera que la lluvia no afecta directamente a las condiciones ambientales, pero sí lo hace indirectamente, influyendo sobre la humedad relativa, la vegetación, la contaminación, la temperatura, etc.

En el caso concreto de la zona de Santiago de Compostela, y en general Galicia, es importante tener en consideración los prolongados períodos anuales de lluvia intermitente o continuada, que obliga a permanecer muchas

horas del día o del tiempo libre en el interior de la vivienda, resultando éste un hecho diferencial en la elaboración del programa de uso de la vivienda, en el que se debería incluir el análisis y valoración de la posibilidad de desarrollar actividades en el interior de la vivienda, en espacios específicos, que en otras circunstancias se realizarían en el exterior o en otro ámbito.

En Galicia, la lluvia ha incidido y singularizado profundamente las edificaciones

Sonido aéreo - acústica

Se trata de una característica de lugar, que hay que analizar de forma específica, para determinar las fuentes y tipos de sonidos concretos. En general son producidos por la actividad del ser humano, pequeñas industrias, talleres, edificios, colegios, polideportivos y por el transporte, autovías, autopistas, ferrocarril, aviones, aeropuertos, etc., también existen sonidos naturales, locales,

Es posible actuar contra la incidencia del ruido mediante barreras o elementos reflectores, siendo las más utilizadas las vegetales, lo que requiere la precaución de plantarlas con tiempo suficiente para que alcancen el tamaño necesario.

Luminancia del cielo

En las condiciones de luminancia del cielo influye decisivamente el clima local, con las condiciones de nebulosidad que puedan predecirse, que condicionarán los estudios sobre iluminación natural de los edificios.

Existen diferentes modelos posibles de luminancia del cielo: cielo cubierto uniforme - cielo cubierto standard - cielo claro - cielo nublado.

Paisaje

Si bien no es una característica climática, sí es una característica con la suficiente importancia para ser tenida en consideración al tomar datos del lugar.

En el diseño arquitectónico es importante porque puede motivar en casos singulares, el tener que abrir huecos o miradores hacia la orientación más desfavorable desde el punto de vista del comportamiento energético y comprometer el esquema funcional de la vivienda para conseguir ese objetivo.

2.2.2.4 Análisis de los datos ambientales del lugar

Con el objeto de poder utilizar la información recogida de manera que nos permita entender rápidamente las características climáticas del lugar, se utilizan los llamados gráficos de análisis higrómetro. Se trata de hacer un resumen de las características de temperatura y humedad de un clima, de tal manera que se pueda apreciar visualmente el tipo de que se trata y su relación

con las “zonas de confort”. Los más conocidos son el de Olgyay y el psicométrico de Givoni

2.2.3 Condiciones ambientales del ser humano

2.2.3.1 *El clima y el hombre*

Los efectos del medioambiente inciden en la salud y en la energía del hombre, y es un tema que se ha estudiado de diversas formas. Se ha observado que en regiones frías el período de tiempo más deseable va desde julio a septiembre y se consideran los meses invernales como las épocas más desfavorables. En regiones templadas, la primavera y el otoño son períodos saludables, mientras que resultan peores el verano y el invierno y en las regiones cálidas, el período más favorable es el invierno, siendo más desfavorable el resto y peor el verano.. .

Estas observaciones sugieren, que la capacidad física y mental del hombre se desarrolla mejor si las condiciones climáticas del entorno oscilan dentro de una gama determinada, pero si se encuentran fuera de ésta, la eficacia decrece y las tensiones y la posibilidad de contraer enfermedades aumentan.

El hombre se esfuerza por llegar al punto en el que adaptarse a su entorno le requiera solamente un mínimo de energía, siendo las condiciones bajo las cuales consigue este objetivo definida como “zona de confort”, en la cual la mayor parte de la energía del ser humano se libera del esfuerzo de adaptación y queda disponible.

La arquitectura en general y la vivienda en particular, es el principal instrumento que nos permite satisfacer las “exigencias de confort” actuando sobre los múltiples aspectos que influyen en las condiciones óptimas de habitabilidad, siendo uno de los aspectos básicos la “sensación de equilibrio térmico” la cual condiciona a todas las demás.

Los medios a través de los cuales el cuerpo humano intercambia calor con su entorno son cuatro procesos: radiación, conducción, convección y evaporación, siendo el problema a resolver crear un entorno que no produzca tensiones negativas sobre el mecanismo de compensación de calor del cuerpo.

2.2.3.2 *Zona de confort*

No existe un criterio unificado para determinar la zona de confort, que también se define en negativo como la zona en que no se produce un sentimiento de incomodidad, una franja muy similar a la zona de neutralidad térmica, que varía según los individuos, el vestido, la naturaleza de la actividad, el sexo (mujeres +1°), edad (mayores 40 años +1°), y la localización geográfica. A partir de la zona central de la zona de confort, el perímetro no está definido con exactitud.

2.2.3.3 *Graficas bioclimáticas*

Victor Olgyay publicó un texto en el año 1962 –Arquitectura y Clima – que contiene una gráfica que expresa la zona de confort en el centro y alrededor los elementos climáticos representados por curvas que indican la

naturaleza de las medidas correctivas necesarias para recuperar la sensación de confort en cualquier punto situado fuera de la zona.

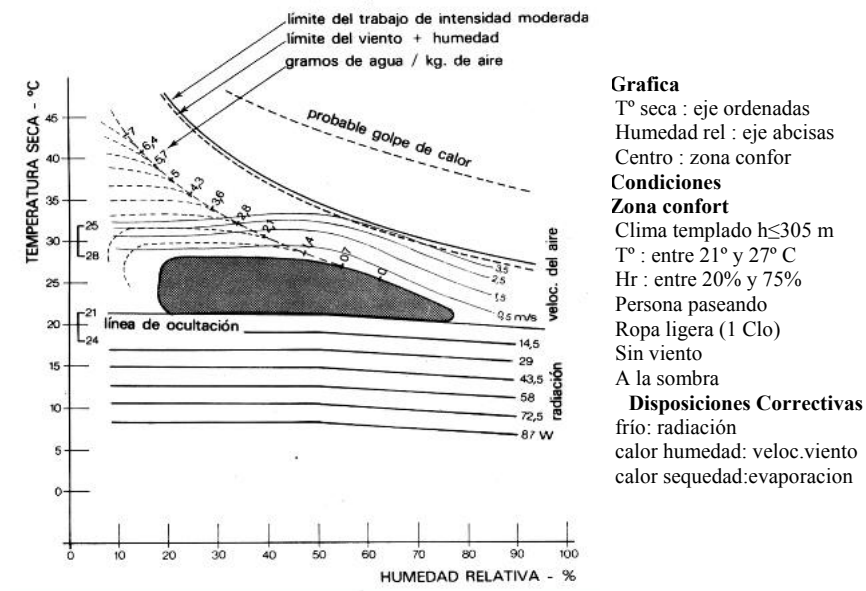


Figura 1. Gráfica bioclimática (Olgyay, 1962).

Permite determinar las características climáticas de espacios abiertos y es de gran utilidad para la elección del emplazamiento y orientación de los edificios

Es un gráfico de aplicación más urbanística que arquitectónica.

♦ Baruk Givoni en su diagrama bioclimático para edificios introduce como variable el efecto de la propia edificación sobre el ambiente interno y el objetivo fundamental de la carta bioclimática consiste en utilizar unos materiales y una estructura constructiva, cuya respuesta ante unas determinadas condiciones exteriores permita crear un ambiente interior comprendido dentro de la zona de bienestar térmico.

La carta se construye sobre un diagrama psicrométrico y se distinguen:

Zona de bienestar térmico delimitada a partir de la temperatura del termómetro seco y la humedad relativa, sin tener en cuenta otros factores.

Zona de bienestar ampliada por la acción de otros factores adicionales:

- hacia la derecha la zona de bienestar se puede ampliar en función de la masa térmica del edificio o el enfriamiento evaporativo, y fuera de estos límites solo se pueden conseguir las condiciones adecuadas con sistemas mecánicos de ventilación y deshumidificación:

-hacia la izquierda del gráfico la zona de confort se extiende siempre que se produzca calentamiento pasivo utilizando la radiación solar directa o calentamiento mecánico, mediante el uso de sistemas convencionales,

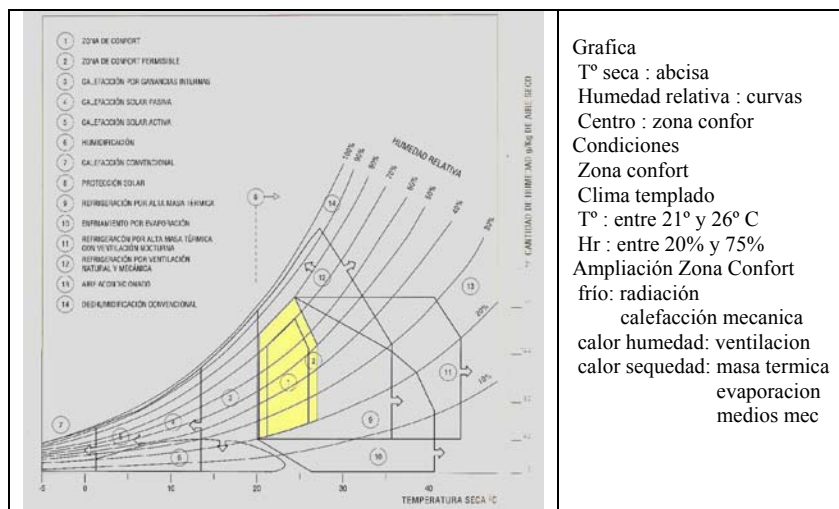


Figura 2. Análisis de Givoni.

El análisis de Givoni consiste en dibujar, en el ábaco, las zonas donde se puede suponer que las actuaciones arquitectónicas, con medios naturales de control ambiental, serán suficientes para devolver las condiciones a la zona de confort.

2.2.3.4 Condiciones generales de la edificación en función del clima

Cálido seco: en verano temperaturas altas durante el día y frescas por la noche

- ubicación protegida de la radiación solar y vientos cálidos, en interior de bosques, zonas deprimidas y próximas a masas de agua
- control de la radiación solar, disminuir exposición, incidencia y captación mediante formas compactas, sombreadas, incluso semienterradas. Pintadas de colores claros, con pocas aberturas al exterior, pequeñas y protegidas con voladizos persianas, o vegetación, cerradas durante el día y abiertas a la noche.
- cerramientos con materiales de gran inercia térmica y aislante por el exterior para retrasar y reducir el paso del calor diurno y almacenar el calor interior durante el día y liberarlo durante la noche, cuando la temperatura es más baja.
- inclusión de patios con agua y plantas, para humidificar el ambiente y facilitar el almacenamiento de aire fresco por la noche.

Cálido húmedo: en verano altas temperaturas día y noche y elevada humedad

- favorecer la ventilación diurna y nocturna, con ventanas en fachadas opuestas, soleadas-sombreadas, en alturas distintas, facilitando el tiraje térmico
- ubicación próxima al mar y en lugares cercanos a lagos o ríos donde las corrientes de aire eviten el estancamiento del aire

- emplazamientos elevados para aprovechar corrientes de aire la ventilación en climas muy húmedos es recomendable:
- separar el edificio del terreno en lugares muy húmedos
- usar formas poco compactas para aumentar la refrigeración nocturna por la mayor superficie de radiación a la bóveda celeste durante la noche.
- cubiertas y fachadas aisladas y ventiladas, y uso de colores claros
- la inercia térmica no es muy importante porque son reducidas las diferencias de temperatura diurnas-nocturnas.

Frío : en invierno temperaturas muy bajas y en verano suaves o frescas

► conservar el calor generado en el interior mediante construcciones compactas, herméticas y fuertemente aisladas, con mínima superficie expuesta al exterior .

- cuando el grado de radiación solar lo permite es fundamental su aprovechamiento.
- ubicación en laderas orientadas al sur con el norte protegido del viento con vegetación. La cercanía del mar suaviza la temperatura, y la proximidad a ríos o lagos puede provocar el estancamiento de la humedad con el aumento de la sensación de frío, y aparición de niebla que interfiere la radiación solar.
- el asentamiento de la edificación en el terreno proporciona mayor inercia térmica, estabilizando la temperatura y protegiéndolo del frío exterior, pero no se debe entorpecer la radiación solar ni provocar aumento de humedad.
- se debe reducir la superficie de fachadas expuestas al viento, así como el número y tamaño de los huecos, buscando el equilibrio energético entre las ganancias por radiación y las pérdidas energéticas por excesiva permeabilidad.
- se aconseja una alta compartimentación de las estancias porque permite un control diferenciado de la temperatura.

Templado : combinan los componentes de los tipos anteriores, inviernos fríos sin ser extremos, húmedos y ventosos - veranos cálidos con variación de temperatura diurna-nocturna.

► radiación solar en invierno y ventilación en verano, aprovechando la topografía del lugar.

- fachada orientada al sur con ventanas que permitan el soleamiento y dispongan de elementos de control.
- cerramiento con masa térmica y aislamiento por el exterior para almacenar la radiación solar que entra por los huecos y su emisión diferida al interior por la noche durante el invierno.
- en verano elementos de control de la incidencia de la radiación en ventanas y posibilidad de ventilación nocturna. La masa térmica en el interior favorece la absorción del exceso de calor diurno.
- cubierta aislada y con abertura para provocar tiraje térmico en verano.
- favorecer la circulación del aire en verano con espacios abiertos, e interconectados tanto en horizontal como en altura..

- utilización de la vegetación con hojas caducas para controlar la radiación solar sobre los paramentos en verano y facilitarla en invierno.

3 Ejemplo de Estrategia de Diseño en clima templado

3.1 Objetivo

Una vez definido el programa de la vivienda, estudiado el medio físico y ambiental del emplazamiento, analizadas las alternativas constructivas y valoradas las posibilidades de dotar a la vivienda del confort ambiental necesario por medios naturales, se pasa a la fase específica de diseño, y se toman las decisiones constructivas que se llevarán a cabo en la ejecución de la obra. Debemos tener presente que al tomar decisiones en algún aspecto del diseño de una edificación, éstas afectan simultáneamente a los aspectos funcionales, formales, constructivos, económicos, y energéticos aunque puntualmente se ponga el énfasis, como en esta exposición, solamente en el último.

3.2 Criterios generales

3.2.1 Situación

En función de las características específicas de la parcela, con carácter general situaremos la vivienda alejada de los lindes, para poder plantar los árboles, setos u otros elementos que puedan ser necesarios para control ambiental y privacidad.

3.2.2 Acceso

El acceso está condicionado por los viales existentes, pero el que más favorece a la resolución de la vivienda es el que queda situado al norte, porque permitirá tener la zona de expansión al exterior, al sur, protegida de la vía pública.

3.2.3 Terreno en pendiente

Si el terreno es en pendiente, se procurará situarla alta, para tener un mejor aprovechamiento del viento, valorando su intensidad, y más campo visual sobre el paisaje. Se deben evitar los terrenos cuya pendiente quede expuesta al norte, porque determinará una mala orientación hacia el sol, casi imposible de corregir.

3.2.4 Infraestructuras

Se deberá tener presente la acometida a los servicios municipales disponibles o posibles en un futuro, así como el acceso para abastecimiento de combustibles como biomasa.

3.2.5 Orientación

La orientación preferente es al Sur, en el hemisferio Norte, porque es la que permite disponer de la mayor cantidad de horas de sol, y a su vez la que

más facilita el control de la incidencia de los rayos solares en el interior de la vivienda en el verano. Esta orientación permite captar mayor cantidad de radiación solar.

Esto es debido a que en verano, la mayor altura del sol sobre el horizonte motiva que los rayos incidan con mayor ángulo, más perpendiculares, resultando más fácil controlar su entrada al interior de la vivienda, con un vuelo o elemento similar. En cambio en invierno, cuando es más necesario, al estar el sol más cercano al horizonte, con menos altura, los rayos inciden más próximos a la horizontal, y penetran profundamente al interior de la vivienda pasando por debajo de las protecciones previstas para contenerlo en verano.

3.2.6 Organización funcional

Los espacios de la vivienda se organizarán de manera que contribuyan a mejorar el funcionamiento energético del conjunto. Podemos clasificar los espacios, con carácter general - en los que se desarrolla una actividad grupal o social, sala de estar y comedor - en los que la actividad es privada, dormitorios y - en los que cumplen una función de servicio, cocina, lavadero, baños, trastero y garaje.

En base a esto, se debe orientar la sala de estar y el comedor al Sur, que es la orientación que permitirá tener un mejor nivel de confort. Los dormitorios se orientarán, al Este o al Sur, dado que por el Oeste llega el sol a última hora de la tarde, y en verano las habitaciones estarían muy recalentados. Los espacios de servicio se colocan en la fachada norte y cumplen una función de barrera entre esa fachada fría, en la que nunca incide el sol, y el resto de los espacios más calientes. El acceso se debe prever por la fachada norte, porque es la que da frente a la vía pública y, no interfiere en la zona de expansión exterior situada al sur.

3.2.7 Captación de energía solar

Esta organización funcional, nos permite tener los espacios más amplios, comedor y estar orientados al Sur, y disponer en ellos de ventanales que permitan captar la radiación solar directa y reflejada.

También se pueden incorporar a estos espacios galerías, invernaderos o elementos especiales como los muros trombe, y elementos de gran inercia térmica que permitan acumular la energía solar para cederla después al resto de la vivienda, por distintos sistemas.

3.2.8 Envolverte

Los muros de cierre deben ser aislantes, y con masa térmica hacia el interior, para permitir la acumulación de la energía de radiación captada por las ventanas, y la generada en el interior, que luego se emitirá diferida a los locales por efecto de la inercia térmica.

La cubierta deberá estar aislada, y en el caso de zonas lluviosas, con un buen sistema de evacuación del agua.

3.2.9 Ventilación

Es un elemento fundamental para mantener la salubridad de los espacios interiores y moderar su temperatura interior en verano. Se provoca la entrada

del aire por la fachada norte, más fría y se permite su salida por la opuesta, más caliente, denominada ventilación cruzada, refrescando el interior de la vivienda.

3.2.10 Espacio interior

Es conveniente que el espacio no esté excesivamente compartimentado, sino que es deseable que el aire pueda circular y refrescar toda la vivienda, para lo cual hay que diseñar el interior con un criterio de continuidad espacial, sin comprometer la posibilidad de disponer de aislamiento y privacidad.

Los espacios altos favorecen el movimiento del aire, lo cual se intensifica si se proyecta una ventana de cubierta o aberturas altas provocando el efecto chimenea

3.2.11 Elementos de control solar interior

Como ya se ha mencionado, la radiación solar se tiene que poder controlar durante el verano para evitar el excesivo calor en el interior de la vivienda o su pérdida por la noche en invierno. Para ello se debe disponer de un buen sistema de carpintería exterior, con suficiente capacidad aislante, rotura de puente térmico, que incorpore distintas posiciones para permitir la ventilación controlada, aún en invierno y acristalamiento aislante térmico con dos cristales, uno de ellos de baja emisividad,. Estas carpinterías deben disponer de elementos de oscurecimiento y control solar, como cortinas de enrollar, estores, cortinas de tela, persianas, o combinación de diferentes tipos, que el usuario debe accionar en función de las necesidades de confort.

3.2.12 Tratamiento del exterior

El control solar también se puede realizar desde el exterior con toldos, pérgolas, porches, parras, árboles y plantas de distintos tipos, teniendo presente que en invierno no deben impedir el paso del sol.

Se debe tratar el entorno de la vivienda con elementos vegetales, césped y plantas que contribuyan a refrescar el aire en verano. Esto también es conveniente en la fachada norte, por donde entrará el aire fresco para la ventilación cruzada.

Se puede prever una buena relación exterior-interior, incorporando espacios intermedios como los invernaderos, que cumplen una doble función como captadores de energía y prolongación del espacio de uso interior.

Se debe tener en cuenta el paisaje, como elemento enriquecedor de la vivienda, disponiendo las aberturas hacia el mismo con las proporciones y diseño adecuado para favorecer su disfrute y controlar, si es el caso, las pérdidas de energía por orientación.

Se deberán plantar con antelación suficiente los árboles y plantas para dotar a la finca de privacidad, zonas de sombra y control de los vientos dominantes.

3.2.13 Déficit energético

Se complementará con medios mecánicos que utilicen energías renovables.

Referencias

- Victor Olgyay – Arquitectura y Clima – Gustavo Gili - 1963
Jaime López Asiain – Arquitectura, Ciudad y Medioambiente – Kora -
2001
Rafael Serra Forensa
Helena Coch Roura – Arquitectura y energía natural – UPC -
1995
Enrico Tedeschi – Teoría de la Arquitectura – Nueva Vision -1962
Ester Higuera – Urbanismo Bioclimático – Gustavo Gili - 2006
Jeremy Rifkin – La civilización Empática – Paidós - 2010
Jornadas de Arquitectura Bioclimática – Colegio Oficial Arquitectos de
Galicia años 1998/99/2000/01/02/03/04/05/06/07/08/09/10

Deseño bioclimático da vivenda en Galicia

**Noela Vázquez Ledo, M. del Carmen
Taboada Gómez, Pastora M. Bello Bugallo**

Aula de Enerxías Renovables. Universidade de Santiago de Compostela

1 Introducción

Cada lugar do mundo ten unhas características climáticas que determinan o deseño arquitectónico, e o principal obxectivo dos construtores foi sempre a busca das condicións óptimas de confort térmico.

A zona temperada, onde se atopa Galiza, ten un clima natural favorable e con poucas esixencias nos condicionantes térmicos para os humanos. A edificación ten que ser a chaqueta estival e tamén o abrigo comfortable.

A construción dunha vivenda que aproveite as potencialidades da natureza para crear unhas condicións de vida adecuadas, desenvólvese en distintas etapas. O proceso máis correcto a seguir é o descrito por *Victor Olgyay* en “*Desing with climate*” (1963). Este divide o proceso construtivo en catro etapas e seguirase esa secuencia: Clima → Bioloxía → Tecnoloxía → Arquitectura

2 Desenvolvemento dos conceptos da bioclimatoloxía en Galiza

2.1 *Clima en Galiza*

2.1.1 O contexto latitudinal de Galiza

Galiza queda enmarcada entre os 42° e 44° de latitude norte, nunha posición excéntrica dentro do continente europeo (MARTÍNEZ CORTIZAS, et al. 1999). Esta zona nordoccidental de Europa eríxese nun punto de encontro de diversas masas de aire que lle imprimen unha gran variedade climática. Por esta posición Galiza ten un claro carácter oceánico, que se traduce nunha apreciable suavidade térmica, en ambientes húmidos e abundantes precipitacións.

2.1.2 O relevo na expresión climática

As manifestacións climáticas que se presentan teñen un forte control orográfico grazas á complexa articulación das unidades do relevo do noso país. Hai dous trazos que definen o noso relevo: a gradación de formas desde a costa cara ao interior e a existencia dunha dicotomía horizontalidade/verticalidade en todo o seu territorio. (PÉREZ ALBERTI, 1982). Tanto a forma recortada como a presenza de barreiras orográficas próximas a liña da costa provocan inestabilidade, facendo forte a presenza de precipitación. Os vales costeiros, as rías, facilitan o paso dos sistemas de nubes vinculados ás fronteas de orixe oceánica. E no interior de Galiza os vales fluviais convértese en áreas onde a radiación e as condicións térmicas difiren dunha vertente a outra e do seu contorno próximo.

2.1.3 Precipitacións

A pluviometría aumenta durante os meses da estación húmida -outono, inverno- por mor das perturbacións atlánticas. Pola contra, hai unha diminución máis ou menos marcada, aínda que sempre presente, da precipitación no verán. (MARTÍNEZ CORTIZAS, et al. 1999)

2.1.4 Ventos e brisas

Galiza atópase inmersa na zona de circulación dos poñentes, os ventos de suroeste -oeste son os predominantes durante o período outono - inverno. No verán as altas presións subtropicais inverten a rosa dos ventos, facendo que os fluxos norte -nordeste sexan os de maior frecuencia. En calquera caso, hai que subliñar que as características e disposicións do relevo galego introducen modificacións intensas na dirección dos fluxos a moi diversas escalas.

2.2 *Sol e terra*

2.2.1 Radiación e materia

O ángulo co que inciden os raios do sol sobre unha superficie determinará a cantidade de enerxía que recibe esta superficie. O ángulo que os raios solares forman cunha perpendicular á superficie (tamén chamado ángulo de

incidencia) determinara a porcentaxe do solleiro directo que interceptará a superficie. A cantidade total de enerxía interceptada por unha superficie non só comprende a radiación directa, senón tamén a difusa e a reflectida. (MAZRIA, E. 1963)

2.2.2 Os recorridos do sol

Cando a radiación solar incide sobre a superficie dun material poden ocorrer tres casos. A radiación pódese reflectir, transmitir ou absorber. A radiación solar absorbida por unha superficie convértese inmediatamente en enerxía térmica. O movemento aparente do Sol é o mostrado na figura 1. Un observador vería que o sol segue unhas traxectorias, como as indicadas, nas que, o sol nace no sector situado ao leste e ponse no situado ao oeste.

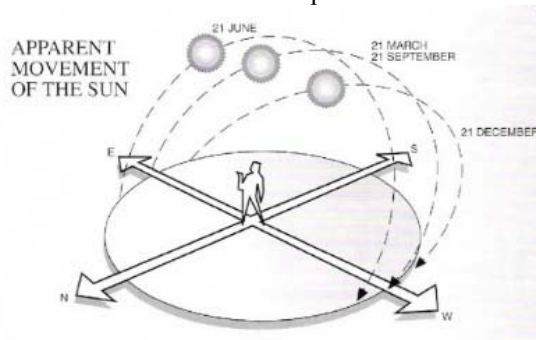


Figura 1. Movemento aparente do sol (Fonte: LEBENS, 1983)

Ademais de variar o tempo que está o sol sobre o horizonte, este varía de forma estacional a altura que é capaz de acadar. A bóveda celeste (MAZRIA, E. 1963) é o hemisferio do ceo visible en todas direccións por riba do horizonte. A cuadrícula do gráfico solar representa os ángulos verticais e horizontais dos puntos da bóveda celeste (Figura 2). Pódese debuxar a traxectoria do sol unindo os puntos de posición do sol para as diferentes horas do día.

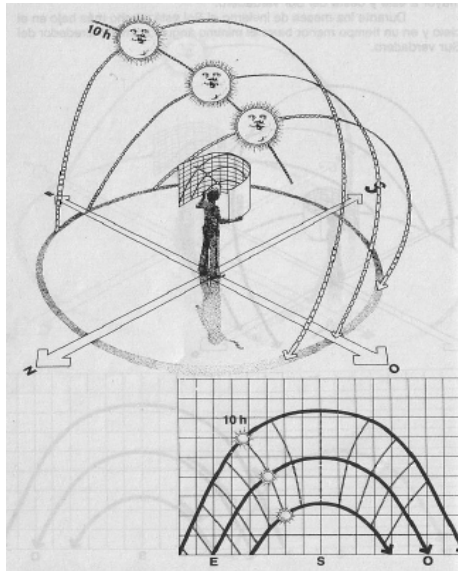


Figura 2. Trazado da gráfica solar cilíndrica (Fonte: MAZRIA, 1983)
 Deste xeito, pódese trazar a traxectoria do sol en calquera día do ano. Durante os meses de inverno o Sol está moito máis baixo no ceo que nos de verán. O gráfico complétase engadindo as horas do día (Figura 3).

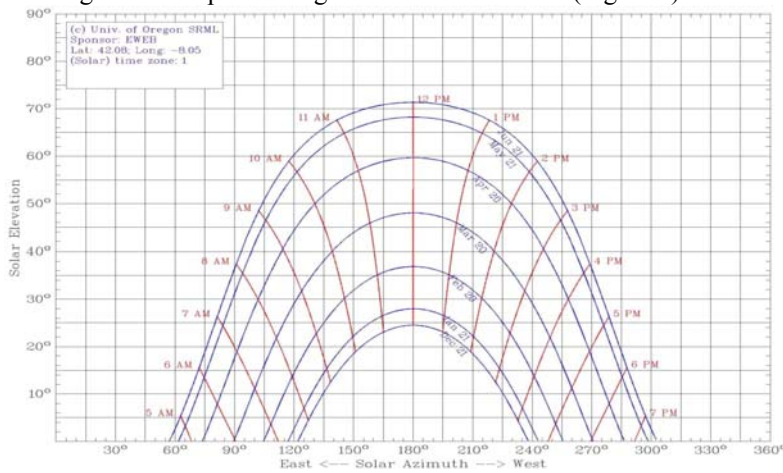


Figura 3. Gráfica solar cilíndrica para Salvaterra de Miño, Pontevedra (University of Oregon Solar Radiation Monitoring Laboratory).

2.3 Bioclimatismo

Os constituíntes do entorno: luz, son, clima, espazo... inciden directamente no corpo humano. O humano esforzase por chegar ao punto no que se adaptar ao seu contorno lle requira soamente un mínimo de enerxía. As condicións baixo as que se consegue este obxectivo defínense como “zona de confort”. A vivenda é o principal instrumento que permite satisfacer as esixencias deste confort. Debe filtrar, absorber ou repeler os elementos medio

ambientais segundo inflúan benéfica ou negativamente no confort do ser humano, debe conseguir o equilibrio térmico.

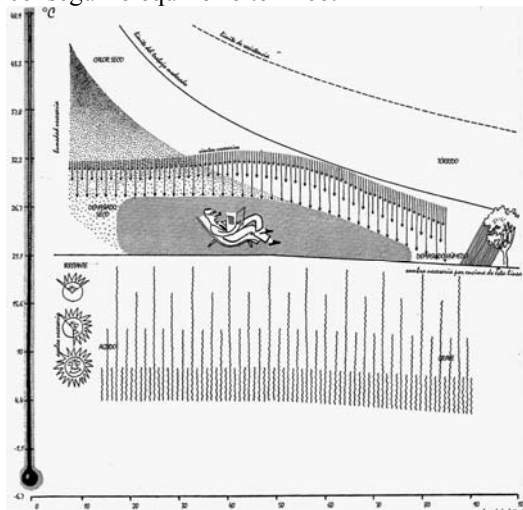


Figura 4. Índice esquemático do bioclima (Fonte: OLGAYAY, 1963)

Os principais elementos que afectan ao confort térmico humano son: a temperatura do aire, a radiación solar, o movemento do aire e a humidade (OLGYAY, 1963). Débese indicar que non existe un criterio único para realizar unha avaliación precisa do confort xa que se usan asuncións arbitrarias. Victor Olgyay fai unha aproximación do que é a “zona de confort” na súa gráfica bioclimática (Figura 4).

2.3.1 Gráfica bioclimática Olgyay

Segundo OLGAYAY, V. (1963) os efectos dos elementos climáticos pódense agrupar e expresar nunha única gráfica (Fig. 8). O diagrama pódese aplicar aos habitantes de zonas climáticas moderadas que non estean situadas moi por riba dos 305 m de altura sobre o nivel do mar, con roupa normal para o interior, en estado sedentario ou con traballo lixeiro.

Constrúese colocando nas ordenadas a temperatura seca en graos centígrados e a humidade relativa no eixo das X. No centro atópase a zona de confort, se non se entra nesta zona tamén mostra as correccións climáticas posibles. A este gráfico haberá que superpoñerlle as liñas que unen as medias máximas e as medias mínimas de cada mes. Na figura móstrase un exemplo para Salvaterra de Miño en Pontevedra (Figura 5).

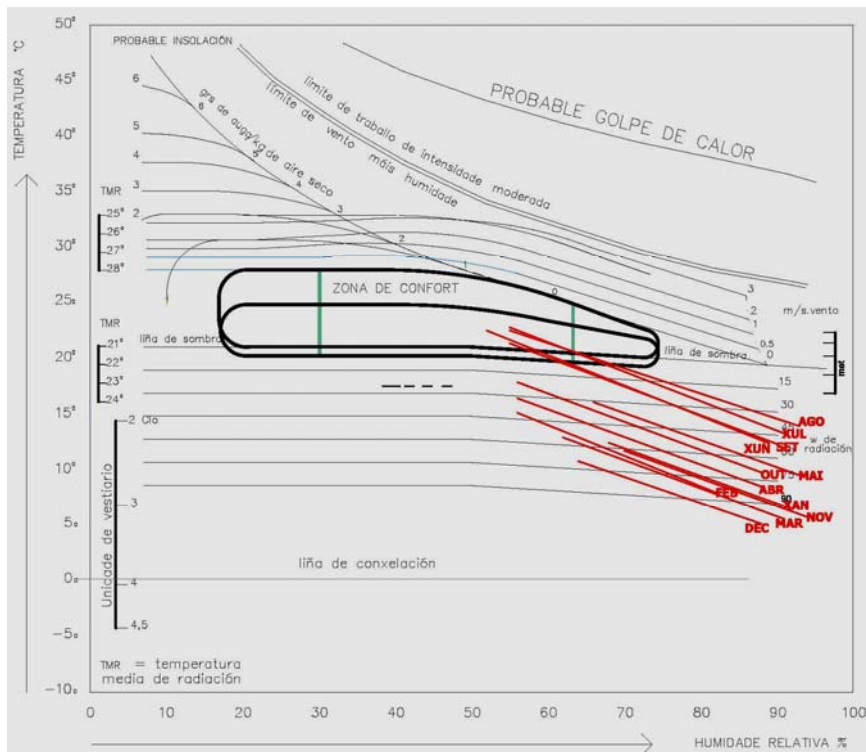


Figura 5. Gráfica bioclimática de Olgay e aplicación en Slavterra de Miño, Pontevedra (OLGYAY,1963)

2.3.2 Carta bioclimática de Givoni

Outro método é a carta bioclimática de Givoni, esta diferénciase da anterior en que ten en conta as características da construción como modificadores do clima exterior (Figura 6).

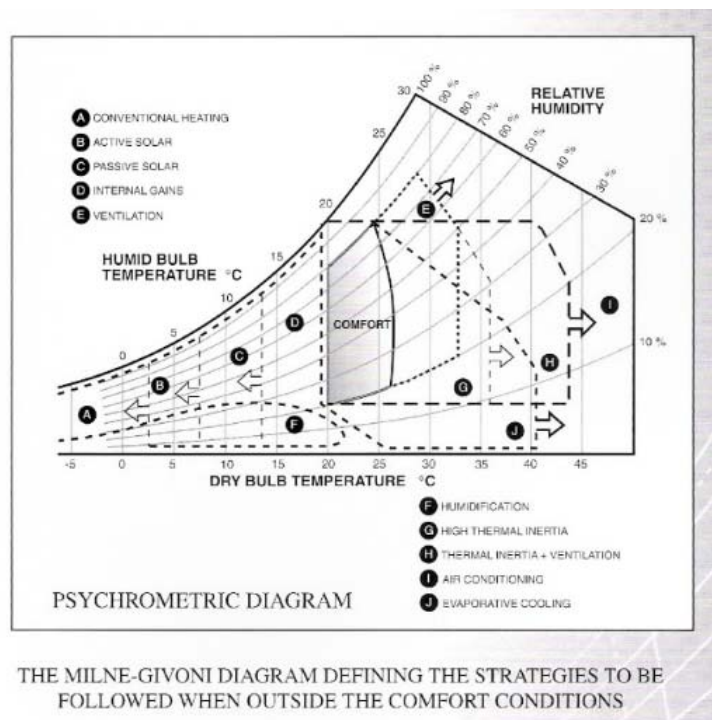


Figura 6. Gráfica bioclimática de Givoni (Fonte: LEBENS, 1983)

3 Metodoloxía bioclimática do deseño arquitectónico da vivenda en Galiza

3.1 Elección do emprazamento

O lugar a decidir para situar a edificación é unha das decisións máis importantes do proxecto. Para escoller o mellor emprazamento é importante ter conta dos distintos aspectos nos posibles lugares estudando as diferentes circunstancias que inflúen no ámbito térmico.

3.1.1 O microclima

Calquera diferenza de altitude, subsolo, álveos, contorno, etc... producen fortes variacións no clima local, estes factores conforman o microclima (OLGYAY, V., 1963).

3.1.1.1 A topografía

Pequenas diferenzas no terreo poden orixinar marcadas modificacións microclimáticas. Pola noite coa falta de radiación prodúcese unha capa de ar frío preto da superficie do solo. Este aire frío circula cara os puntos máis baixos producindo “illas frías”. Por esta razón, a existencia de elevacións no terreo producen un efecto dique (Figura 7); e así mesmo, as concavidades son lagoas de aire frío (GEIGER, R., 1950).

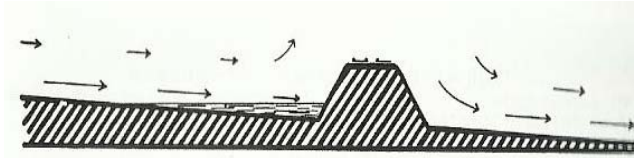


Figura 7. Asolagamento de ar frío (Fonte: OLGAYAY, 1963)

As planicies, as ladeiras dos vales e a superficie do solo do fondo do val arrefríanse durante a noite, xa que o fluxo de ar se produce preto do solo (Figura 8). E nas ladeiras orixínanse pequenas circulacións de aire frío que se mesturan co cálido procedente das zonas habitadas proporcionando temperaturas intermedias (Figura 9).

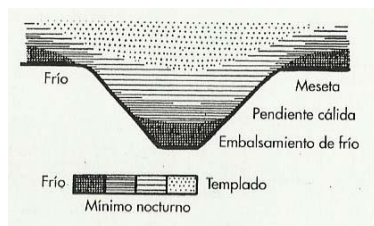


Figura 8. Temperaturas nos vales
(Fonte: OLGAYAY, 1963)



Figura 9. Movemento de ar nos vales
(Fonte: OLGAYAY, 1963)

As planicies, as ladeiras dos vales e a superficie do solo do fondo do val arrefríanse durante a noite, xa que o fluxo de ar se produce preto do solo. E nas ladeiras orixínanse pequenas circulacións de aire frío que se mesturan co cálido procedente das zonas habitadas proporcionando temperaturas intermedias.

Atendendo a radiación é importante saber que a falda dunha montaña recibe o impacto desta en función da inclinación e a dirección das súas ladeiras. Detallárase o estudo realizado por OLGAYAY V. (1963) onde mostra o impacto da radiación en distintas pendentes. Os datos que utilizou este experto foron os de New York cunha latitude de 40 °N, bastante comparable coa de Galiza (Figura 10). O estudo di que é máis axeitado optar por unha superficie inclinada antes que por unha horizontal e en pendentes de 10° e 20°. O autor agrupou en cinco categorías arbitrarias os impactos de radiación en todas as orientacións.

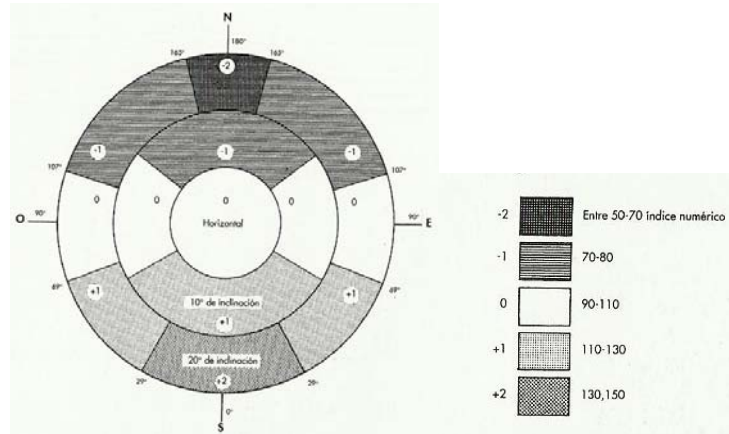


Figura 10. Avaliación do efecto da radiación solar total para New York, en pendentes de ata os 20° (Fonte: OLGAYAY, 1963)

Atendendo ao vento e as precipitacións, tamén é salientable o estudo de GEIGER (1950). Unha montaña desvía as refachos de vento orixinando maior aceleración preto do cumio e menos turbulencias na zona baixa da mesma. Créanse zonas de alta velocidade por debaixo e a ambos lados da cima e os fluxos máis lentos localízanse preto da base (Figura 11).

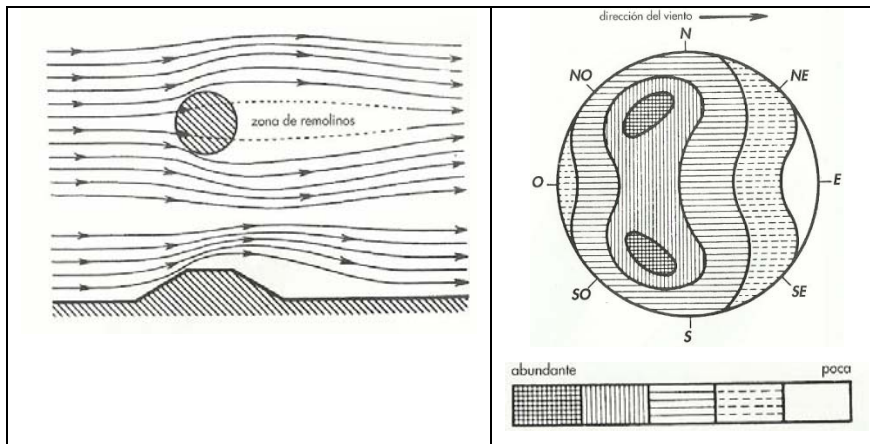


Figura 11. Efecto da velocidade do vento nun outeiro (Fonte: OLGAYAY 1963)

Na cara do outeiro que se atopa enfrontada ao vento, os refachos empurran as precipitacións cara á aba, caendo de forma máis vertical cara á base, onde prevalecen movementos de aire máis débiles e irregulares (Figura 12).

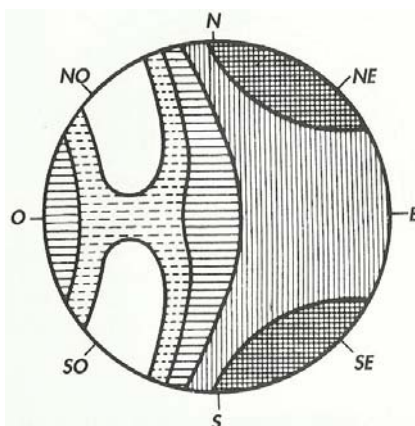


Figura 12. Distribución de precipitacións nun outeiro (Fonte: OLGAYAY 1963)

3.1.1.2 O contorno

As masas de auga: a proximidade de masas de auga modera as temperaturas extremas, elevando as mínimas en inverno e diminuindo as máximas no estío. Durante as variacións diúrnas da temperatura, prodúcense movementos baixos de aire cara ao interior. Pola noite a dirección e oposta.

Características naturais do terreo: A capa de plantas e herba que cubre o solo reduce as temperaturas absorbendo parte da insolación e arrefriándose a través da evaporación.

As cidades: De xeito contrario, as cidades e as superficies realizadas polo humano tenden a elevar as temperaturas, xa que a maioría dos materiais usados son absorbentes.

3.1.1.3 Selección do emprazamento

A exposición ideal tende cara á zona máis oriental do sur dunha ladeira, tal e como indica o índice de orientación (Figura 13).

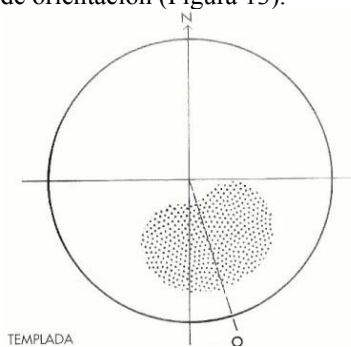


Figura 13. Emprazamento máis favorable nun outeiro na zona climática temperada (Fonte: OLGAYAY, 1963)

3.1.1.4 Situación da construción dentro do emprazamento

Unha vez elixido o terreo onde se creará a edificación, é preciso situar a construción dentro deste recinto. A posición ideal é que a zona onde se vai edificar sexa a máis soleada na parte norte da área para recibir sen obstrucións o aporte solar no inverno.

3.1.2 O Sol

3.1.2.1 Trazado da liña do horizonte

Para determinar exactamente o tempo en que hai radiación directa do sol é necesario trazar o perfil das obstrucións vistas desde o punto de emprazamento. Para trazar a liña do horizonte (MAZRIA, E. 1983) é preciso medir os ángulos das obstrucións que existen. Despois a liña de horizonte debuxarase sobre o gráfico solar da latitude (*Figura 14*).

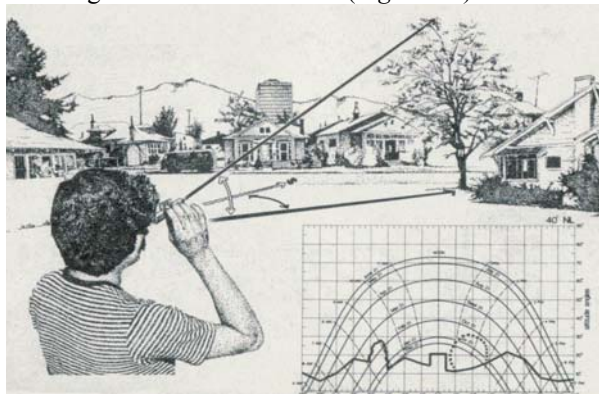


Figura 14. Trazado da liña do horizonte (Fonte: MAZRIA, 1983)

3.2 Orientación

A orientación dun edificio determina a cantidade de radiación que incide nos distintos lados del en diferentes momentos. Volvendo o estudo realizado por Olgyay (1963), pódese deducir que na nosa latitude: a fachada sur dun edificio recibe en inverno aproximadamente o dobre de radiación que no verán; as fachadas orientadas cara ao leste e o oeste reciben máis radiación en verán que no inverno; os impactos das altas temperaturas no lado oeste aumentan por efecto da radiación no atardecer; a cara norte recibe soamente unha pequena cantidade de radiación, que é especialmente baixa no verán; e a cantidade de radiación que incide nunha cuberta horizontal durante o verán supera á de calquera das outras superficies

3.3 Formas edificatorias

A forma óptima é aquela que desprende a mínima cantidade de Kcal no inverno e que absorbe a mínima cantidade no verán. Cos datos mostrados no punto anterior pódese concluír que a forma óptima nas zonas temperadas, coma a nosa, a temperatura permite un deseño de planta máis flexible, pero a forma alongada e a máis apropiada. En Galiza sopórtanse plantas en forma de

cruz ou libres, non obstante, débese destacar que un edificio rectangular desenvolvido ao longo dun eixo leste - oeste é definitivamente a forma máis axeitada.

3.4 Fachada norte

A fachada norte dun edificio é a máis fría, a máis sombreada e normalmente a menos usada, debido a que, como se indicou anteriormente, non recibe a radiación solar directa en inverno. O edificio débese conformar de maneira que a súa cara norte desapareza baixo a pendente do teito. Cando sexa posible, débese anexionar a unha escaleira do terreo que estea orientada cara ao sur e/ou débese acumular un noiro de terra sobre esta fachada para reducir a superficie exposta ao norte. Desta última forma, acúrtase a sombra producida en inverno polo edificio e tamén se reducen as perdas de calor a través da parede.

Cando non é posible enterrar o edificio, pódese inclinar a vertente norte da cuberta, cun ángulo similar ao do Sol de mediodía, e así, a sombra proxectada polo edificio no inverno se reduce.

3.5 Distribución interior

A maior parte das necesidades de calefacción e iluminación dos espazos interiores, pódense satisfacer situándoos ao longo da fachada sur do edificio, para así captar a enerxía solar durante as diferentes horas do día. Débense colocar as habitacións cara ao sueste, sur e suroeste, de acordo cos seus requirimentos de asollado. Os espazos que teñen as mínimas necesidades de calefacción e iluminación, como corredoiros, lavanderías e garaxes entre outros, pódense situar ao longo da fachada norte do edificio, e así serán espazos protectores das zonas quentes. Débense ter en conta tamén as exixencias do asollado de cada espazo, por exemplo, nunha vivenda pódese orientar a zona de almorzo cara o sueste para recibir o sol da mañá.

É interesante a táboa realizada por Aronin J. (1953) onde define orientacións apropiadas para as diferentes estancias das edificacións residenciais (Figura 15).

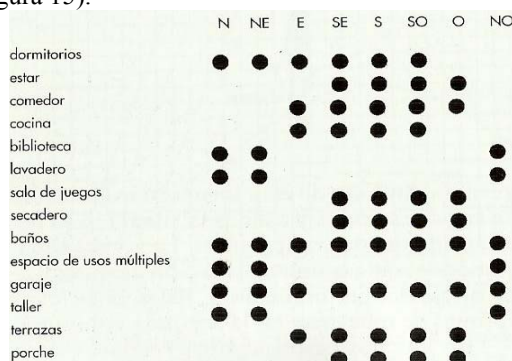


Figura 15. Orientacións para distintas estancias (ARONIN, 1953)

3.6 *Protección da entrada*

No inverno, unha grande cantidade de aire frío exterior penetra no edificio a través da porta de entrada. Por isto, a entrada principal se debe transformar nun pequeno espazo pechado (vestíbulo) que proporcione unha separación entre a vivenda e o exterior, transformándose nunha cámara de aire.

Do mesmo xeito, a entrada débese protexer respecto aos ventos fríos do inverno, situándoa nun recuncho protexido ou colocando pavimentos exteriores. Na latitude de Galiza, as entradas mellor situadas estarán no sueste quedando protexidas do impacto do vento de inverno e da fría zona norte. Se non é posible, se debe protexer eficazmente con barreiras de vento de vexetación de folla perenne ou muro edificado a propósito, ou senón refundila no edificio ou engadir paredes laterais.

3.7 *Situación das fiestras*

Resulta moi importante situar as fiestras de xeito que obteñan as máximas ganancias de sol posibles, de forma que estas superen as perdas que poidan ter. Durante o estío, as mesmas ventás precisan estar sombreadas para evitar os aportes de calor non desexados.

É recomendable situar as ventás principais cara ao sueste, sur e suroeste, de acordo coas necesidades internas de cada espazo. Cara o leste, oeste e especialmente cara ao norte do edificio débense reducir as superficies de ventás e se é posible, estas refundiranse para reducir as súas perdas térmicas (MAZRIA, E. 1983).

A orientación óptima dunha ventá para a captación solar é a do sur exacto; porén, variacións cara ao leste e oeste de ata 30°, na posición de Galiza, reducirán moi pouco o rendemento.

3.8 *Sistema de calefacción*

Dentro da arquitectura bioclimática, existen dúas calefaccións solares para os edificios: os sistemas activos e os sistemas pasivos (MAZRIA, E. 1983).

Neste caso estudaranse os sistemas pasivos, que son os que captan e transportan a calor mediante sistemas non mecánicos. É un sistema no que os fluxos térmicos de enerxía se transportan por medios naturais, como a radiación, conduction e convección. A construción do edificio, total ou parcialmente, é o sistema.

3.8.1 *Pasivo de aporte directo*

Este sistema é o que usa as “fiestras solares” (Figura 16). O espazo habitable quéntase, en cada momento, directamente co sol. As habitacións convértense á vez en captador, depósito e sistema de distribución. Os sistemas directos sempre están funcionando, captan calquera cantidade de enerxía que atravesese o vidro, sexa directa ou difusa. Por esta razón non só dan bo resultado en climas soleados, senón tamén en climas anubrados, como o noso, pola gran proporción de enerxía difusa.

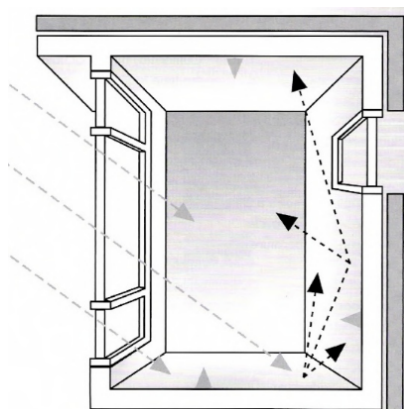


Figura 16. Sistema de aporte directo(Fonte: LEBENS, 1983)

3.8.1.1 Almacenamento térmico

O exceso de calor debe ser almacenado para o seu posterior uso, sen permitir que a temperatura da vivenda se eleve de forma desfavorable. O pavimento e/ou as paredes débense construír con materiais acumuladores de calor e onde o sol poida incidir directamente (Figura 17).

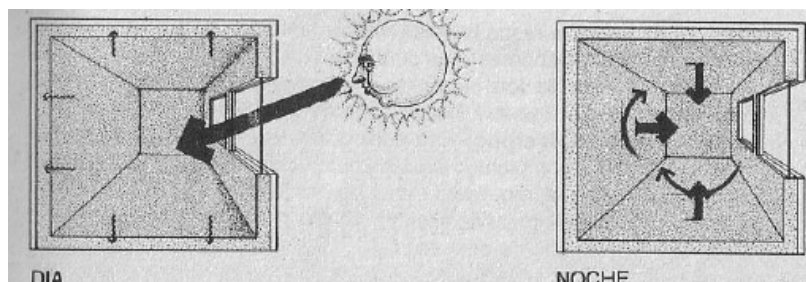


Figura 17. Masa acumuladora térmica (Fonte: MAZRIA,1983)

A masa térmica tempera os efectos do sobre quentamento e absorbe a enerxía sobrante para o seu posterior aproveitamento. Canto máis directamente incida o sol sobre a masa menos fluctuará a temperatura da casa. A localización da masa térmica pode estar no solo, nos muros e/ou no teito (Figura 18).

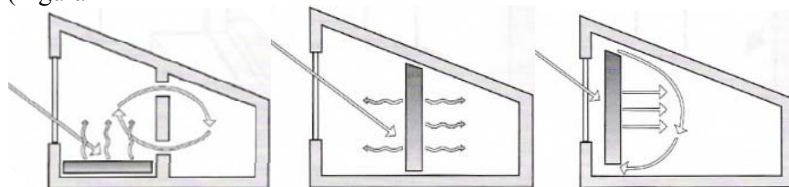


Figura 18. Localizacións do muro acumulador (Fonte: LEBENS, 1983)

Exceptuando a auga, os mellores materiais de acumulación, de fácil obtención son, o formigón, o ladrillo e a pedra.

3.8.1.2 Fiestras captadoras

Os sistemas de aporte directo caracterízanse normalmente polos grandes valores de superficie vidrada ao sur. Edificios existentes que usan grandes superficies vidradas ao sur, a miúdo resultan sobre quentados en días de inverno soleados, mais isto ocorre porque as superficies captadoras están frecuentemente sobre dimensionadas debido á falta de sistemas precisos de cálculo do equilibrio do edificio.

Un procedemento para ampliar a ganancia solar no interior dun edificio é instalándolle unha cuberta de pendente única que ascende en dirección á orientación Sur. Con esta solución sacaráselle proveito a unha fachada sur de maior entidade, onde situar superficies vidradas máis grandes, supoñendo, ademais, dun pinche orientado ao mediodía.

Débese usar illamento móbil nas ventás captadoras durante a noite para reducir as perdas de calor e protexelas do sol de verán colocando protección solar. A superficie da ventá necesaria para quentar un espazo pode reducirse moito utilizando reflectores exteriores.

3.8.1.3 Lucernarios e claraboias

Existen moitos casos onde non é realizable ou desexable introducir a enerxía solar a través de fiestras na fachada ao sur: obstrucións solar, espazos sen exposición posible ao sur, un almacenamento situado demasiado lonxe da fiestra, cegamentos e reflexos, entre outras razóns.

Para solucionar isto utilizaranse lucernarios orientados ao sur e claraboias (Figura 19). Débese utilizar unha cor clara no falso teito xunto ao lucernario e colocar proteccións para o control do sol do verán.

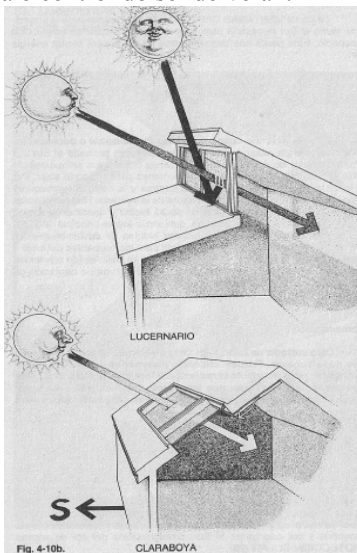


Figura 19. Lucernario e claraboia como fiestras captadoras (Fonte: MAZRIA, 1983)

A radiación a través do teito pódese distribuír a calquera parte do edificio. Isto representa tamén unha liberdade máxima respecto á localización da masa térmica interior.

3.8.1.4 *Previsión de paneis reflectores no exterior dos vidros*

Aínda que non é posible modificar a intensidade da radiación directa, si o é utilizar superficies reflectoras próximas á abertura co fin de aumentar a compoñente reflectida, medida que conduce a aumentar tamén a superficie efectiva de captación da fiestra. Estas poden ser fixas ou móbiles.

3.8.1.5 *Vantaxes e inconvenientes*

Todo o mundo pode utilizar este deseño solar xa que é o máis sinxelo de todos. Un sistema de aporte directo poderase construír normalmente o mesmo prezo que un edificio convencional de obra.

Pola contra, é o sistema menos eficiente desde o punto de vista do almacenamento, neste caso a eficiencia do almacenamento é directamente proporcional ao incremento de temperatura.

Este sistema é máis útil cando se necesita calor cedo na mañá, e durante o día, pero non pola noite (coma nas oficinas, colexios, outros).

3.8.2 Pasivos de aporte indirecto

3.8.2.1 *Os muros solares*

Son paredes construídas para acumular calor, a diferenza coas anteriores é que se sitúan xusto detrás das fiestras, de xeito que o sol incide sobre estas en lugar de quentar directamente a vivenda. Estes muros conducen a calor desde o seu lado quente cara ao lado máis frío do interior, desde onde se irradia a calor cara á vivenda.

A transmisión da calor ademais de realizarse por conduction a través dun muro de alta condutividade térmica tamén se pode realizar combinando esta conduction coa convección natural provocada pola diferenza de temperatura entre o aire da habitación e o muro. Para provocar esta, pódense engadir unhas bocas, tanto na base como na parte alta da parede solar. Así, o muro poderá dar calor a vivenda ao longo da día. Son os muros Trombe (Fig. 20).

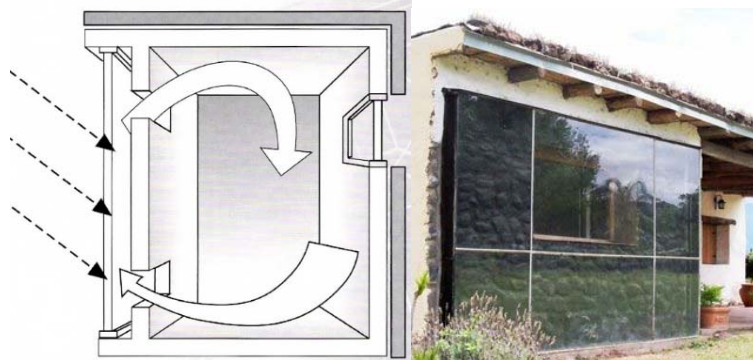


Figura 20. Muro Trombe e vivenda Tucuman, Arxentina (Fonte: www.ecofactory.es)

A zona colectora

A superficie colectora deberase montar a 25 ou 50 mm da parede. Se consta de bocas de ventilación, montarase o vidro cunha separación da parede de 75 a 100 mm, para permitir un adecuado fluxo de aire. Se se superan os 100 mm o rendemento pódese reducir debido a aparición de perdas por convección, xa que existe máis facilidade para o movemento do aire en dito espazo(MAZRIA, E. 1983).

O vidro deberá exceder as partes altas e baixa da superficie da parede de acumulación. E quedar plenamente exposto ao sol.

O efecto da orientación no comportamento térmico do sistema, é relativamente insignificante para pequenas variacións respecto á orientación sur.

En xeral, e debido ao forte salto de temperatura existente, recoméndase a colocación de dobre vidro a non ser que se coloque algún tipo de illamento nocturno, sendo neste caso necesario aumentar a distancia entre o muro e o vidro, para a súa colocación.

Almacenamento

Como regra xeral, pódese dicir que a maior espesor de muro, menor flutuación de temperatura para un mesmo material e para dous materiais diferentes a igualdade de espesor, terase maior flutuación de temperatura no material de maior condutividade.

Existe unha ampla lista de materiais apropiados para o almacenamento térmico en paredes. Pódense dividir en dous grupos principais: obra ou auga. Os materiais de obra inclúen o formigón en masa, bloques de formigón (macizos ou recheos), ladrillo, pedra e adobe.

A calor conducida a través da parede distribúese despois ao espazo interior por radiación e en parte tamén por convección engadindo orificios de ventilación, aínda que será unicamente durante o día.

Rendas de ventilación

Nun día soleado de inverno a temperatura do aire no espazo entre o muro e o vidro pode alcanzar os 60 ou 65 graos de temperatura, se colocamos aperturas na parte inferior do muro, indúcese unha corrente por convección que extrae aire frío da habitación e introduce aire quente pola parte superior do muro.

Este sistema de convección forzada funciona durante todo o día, incluso ata dúas ou tres horas despois da posta do sol.

Cando deixa de funcionar, comézase a producir unha circulación do aire ao revés, arrefriando a habitación, é por isto necesario colocar algún elemento que impida este fluxo durante a noite (MAZRIA, E. 1983)(Figura 21).

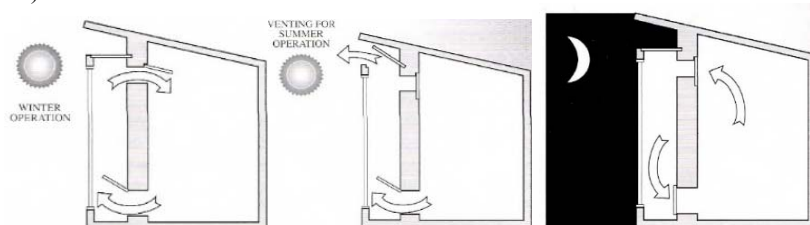


Figura 21. Posicións das rendas de ventilación (Fonte: LEBENS, 1983)

A alternativa das persianas solares verticais

Son a alternativa das paredes de formigón maciza, formadas por un conxunto de columnas rectangulares en dirección sueste - nordeste. Admiten no interior do edificio a luz matinal e almacenan gran parte do sol da tarde. A parte interior do vidro é accesible para a súa limpeza, podéndose instalar, con facilidade, un illamento móbil entre o vidro e as columnas. Pola contra, as columnas ocupan un valioso espazo habitable. Esta modificación dunha parede solar foi utilizada por vez primeira por Jim Bier.

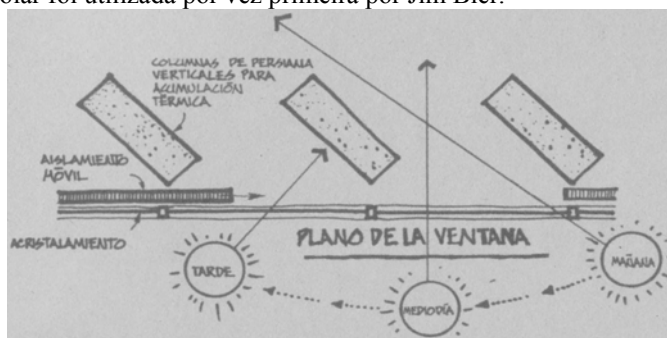


Figura 22. Persianas solares verticais (Fonte: MAZRIA, 1983)

Pantalla no verán

Un muro solar dará unha cantidade pequena de calor durante o estío influíndo sobre o custo da refrixeración. O método máis efectivo para reducir a súa exposición á luz solar directa consiste en poñer unha pantalla á parede mediante un aleiro, un toldo ou unha árbore. Tamén dá bo resultado unha cortina de lona ou tea colocada sobre a parede.

Vantaxes e inconvenientes

Os muros solares ofrecen moitas das vantaxes dos circuitos convectivos, á vez que resollen o problema de acumulación de calor. A masa atópase situada precisamente alí onde fai falla, fronte ao Sol. Esta masa térmica mantén a vivenda a unha temperatura practicamente constante case as 24 horas do día.

Desde o punto de vista de captación é menos eficiente que os sistemas de aporte directo, debido ás altas temperaturas que se obteñen no espazo entre o vidro e o muro, sendo necesaria, aproximadamente o dobre de superficie vidrada, para proporcionar a mesma cantidade de calor a un espazo.

A ganancia de calor non é instantánea, senón retardada ata as últimas horas da tarde, sendo polo tanto un sistema utilizable en usos fundamentalmente residenciais, e neste caso, é conveniente combinalo con sistemas de ganancia directa que dean calor instantáneo nos primeiros momentos do día.

Outro inconveniente é a obriga neste sistema dunha arquitectura de fachadas sur cegas. Por isto, os muros colectores deben ir asociados a unhas fiestras grandes que provoquen unha abertura da vivenda cara ao Sur, e non dun hermetismo que impida a vista e a iluminación natural.

Do mesmo xeito, hai que destacar que o custo é algo alto, non só desde o punto de vista do muro en si, (que é un dobre muro de vidro e formigón)

senón tamén desde o punto de vista estrutural, xa que implica un aumento de peso na estrutura, e por conseguinte na cimentación do edificio.

Por último dicir, que debido á alta condutividade térmica dos materiais usados no cerramento, en climas de predominio anubrado coma o noso, este sistema non é o máis adecuado, xa que o balance entre a enerxía captada e as perdas a través do muro dará un resultado negativo. Así mesmo, no verán, se non se ten coidado de protexelo efectivamente da radiación solar este muro será unha fonte de calor non desexada.

3.8.2.2 Os teitos solares

Os teitos solares son similares aos muros solares, o único que cambia é o lugar de acumulación da calor que neste caso é na cuberta do edificio.

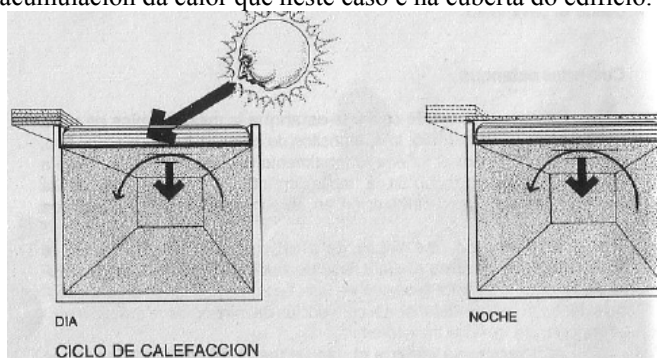


Figura 23. Ciclo de calefacción co teito solar (Fonte: MAZRIA, 1983)

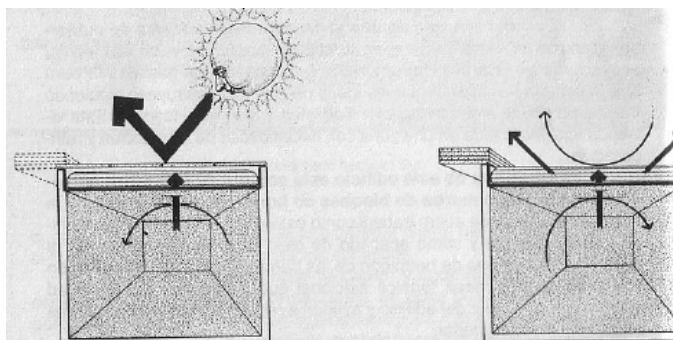


Figura 24. Ciclo de refrixeración co teito solar (Fonte: MAZRIA, 1983)

No inverno, o sistema queda expostos á radiación solar durante o día e recubertos con paneis illantes durante a noite (Fig. 23).

A calor recollida rádiase directamente desde o teito ao espazo inferior.

No verán, invértese o uso dos paneis, recubrindo o sistema durante o día para protexelos do sol, e quitándoos pola noite para refrixerar (Fig. 24).

Como novidade atópase no mercado o teito solar da empresa SolTech Energy Sweden (Fig. 25). Este teito aproveita a radiación do sol a través das tellas transparentes que compoñen a cuberta.



Figura 25. Tellas solares de Soltech (Fonte: soltechenergy.wordpress.com)

3.8.3 As habitacións solares. Invernadoiros

As habitacións solares consisten esencialmente nunha combinación de sistemas de aporte directos e indirectos. Neste caso constrúese un invernadoiro que se sitúa diante da fachada sur, cunha parede pesada separando o invernadoiro do edificio. Como está directamente soleado, o invernadoiro funciona como un sistema de aporte directo, pero ao mesmo tempo, o local adxacente recibe a calor a través da parede pesada, sistema de aporte indirecto (Figura 26).

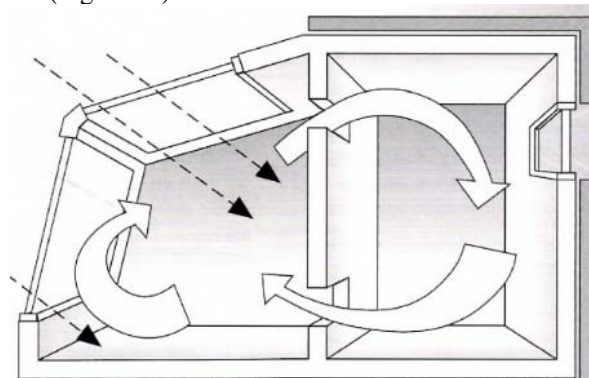


Figura 26. Invernadoiro anexionado (Fonte: LEBENS, 1983)

O invernadoiro anexionado actúa sinxelamente coma un muro acumulador onde a superficie vidrada xa non está a 10 cm diante da parede, senón a 1 m ou máis, o que lle permite crear outro espazo o que pode ser habitable.

Este sistema adáptase mellor aos climas onde domina a radiación difusa coma no noso xa que é capaz de aproveitala.

É recomendable estender o invernadoiro ao longo da fachada sur do edificio anexo, xunto aos locais que se pretende quentar (Figura 27).

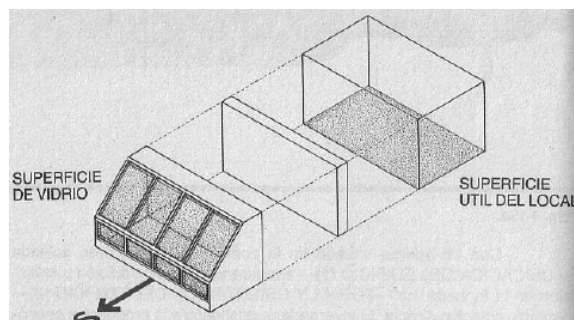


Figura 27. Superficie de vidro do invernadoiro (Fonte: MAZRIA, 1983)

Se é posible incluírase o invernadoiro no volume do edificio de xeito que as paredes leste e oeste dean a espazos interiores. Deste xeito, non só se reducen as perdas de calor, se non que se facilita a transferencia de calor do invernadoiro ao edificio.

3.8.3.1 Como introducir a calor da habitación solar

Dispoñendo fiestras nas paredes existentes entre a habitación solar e a casa, estas permiten o paso directo da luz cara o interior da vivenda (igual que os sistemas de absorción directa), especialmente durante os meses do inverno. Durante o verán, o teito da habitación solar pode dar sombra ás fiestras.

Cando a habitación solar estea quente, abríranse as fiestras e portas permitindo que o fluxo de calor entre na casa. Canto máis altas sexan as fiestras u outras aberturas, máis calor fluirá cara o interior.

Distintas formas de traspasar a calor (Figura 28)

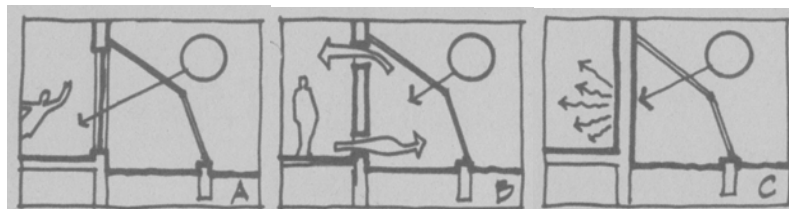


Figura 28. Distintas formas de traspasar a calor.

3.8.3.2 A zona colectora

Como se indicou ata agora, a orientación óptima sempre é ao sur. En climas como o de Galiza, fundamentalmente anubrados, temos un maior grao de flexibilidade. Como regra xeral, podemos dicir que se pode orientar o vidro entre 25 e 35 graos leste/oeste cunha pouca redución na eficiencia do sistema. Para obter un máximo de luz solar, e para un mínimo de perdas de calor pola noite, utilízase illamento móbil conxuntamente co dobre vidro. Pola contra, isto pode ser difícil de lograr.

3.8.3.3 A zona de almacenamento de calor

Do mesmo xeito que noutros sistemas pasivos, as masas térmicas colaboran obtendo bos resultados nas habitacións solares.

O comportamento deste sistema é moi parecido ao muro Trombe, sendo válidas todas as consideracións feitas no apartado anterior.

3.8.3.4 Almacenamento en grava activo

Se o invernadoiro se usa prioritariamente como fonte de calor, pode ser conveniente extraer activamente calor do invernadoiro durante o día e almacenalo no edificio para a súa utilización nocturna. O aire quente extraído do invernadoiro mediante un ventilador almacénase nun leito de grava, situado normalmente nun espazo baleiro baixo o piso do edificio (Figura 29).

A vantaxe deste sistema é que o invernadoiro pode construírse con calquera material e non necesita ter unha parede térmica(MAZRIA, E. 1983).

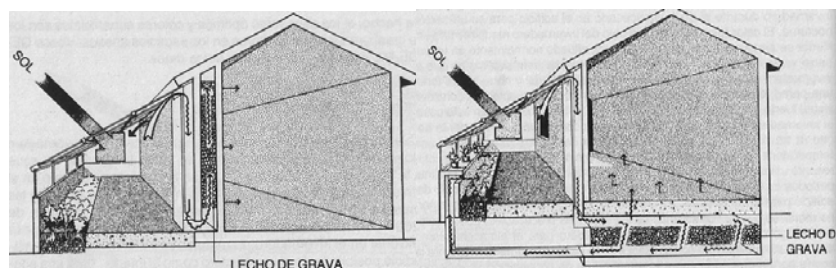


Figura 29. Almacenamento térmico de grava(MAZRIA, E. 1983)

3.9 Control solar

3.9.1 A estrutura

A pel dun edificio actúa como filtro entre condicións externas e internas para controlar a entrada de aire, calor, frío, luz, ruídos e cheiros. En xeral, acéptase que o muro é capaz de controlar, por si mesmo, os efectos do ar, a temperatura, o vento e o ruído, mentres que a luz se controla mellor desde o interior, e a radiación calorífica débese deter antes de acadar a envolvente do edificio.

Os materiais que conforman a envolvente do edificio xogan un papel decisivo no uso e control dos raios do sol. Outra forma deste control é a solución de utilizar elementos físicos para proporcionar sombra. O bloqueo da enerxía prodúcese no lugar correcto, antes de incidir no edificio, reflectindo a radiación e disipándoa cara ao aire exterior. Esta forma da moi bo resultado xa que se pode adaptar ao recorrido solar conseguindo sombra no verán e beneficios caloríficos no inverno.

3.9.2 Efectividade da sombra

3.9.2.1 Influencia da cor e do material

É ben coñecido que as cores claras reflecten o impacto do sol, mentres que as escuras o absorben. Comparando os distintos sistemas de produción de

sombra, a cor produce distintos resultados. A cor branca en persianas venecianas proporcionan un 20 % máis de protección cas de cor escura; e que o aluminio ofrece un 10 % adicional. Nas persianas enrolables o efecto é máis pronunciado e nas cortinas interiores a diferenza non é tan acusada (OLGYAY 1963).

3.9.2.2 *Situación da protección solar*

Os elementos de protección solar interiores interceptan a enerxía solar unha vez que xa traspasou a superficie vidrada, poden eliminar só a porción de enerxía radiante que se pode reflectir e pasar a través do vidro novamente. A outra parte é absorbida e, por convección ou irradiación, dirixida ao interior da habitación.

Se a interrupción se produce na superficie vidrada, parte da enerxía reflectírase, parte será transmitida e parte absorbida. A porción absorbida transmitirase cara ao exterior e cara ao interior da habitación.

Os elementos externos de protección transmiten ao aire exterior a súa porción de enerxía por convección e irradiación, por isto e a mellor forma de protección (OLGYAY, V. 1963).

3.9.2.3 *Eficacia dos diferentes sistemas*

A orde de eficacia, segundo o estudo de Olgyay (1963), sería:

1. Persiana veneciana
2. Persiana enrolable
3. Vidro tinguido
4. Cortina illante
5. Pantalla de sombra
6. Persiana exterior de lamas metálicas
7. Capa protectora sobre vidro
8. Árbores
9. Protección externa
10. Protección fixa exterior
11. Protección móbil exterior

3.9.3 *Efectos da sombra das árbores*

Sendo Galiza unha terra cunha notable presenza de natureza e destacable o uso desta par acomodar as vivendas. Un gran beneficio das árbores é o seu efecto térmico, ademais das distintas vantaxes que teñen noutros aspectos coma satisfacer a necesidade instintiva de protección, diminúen os sons ambientais e a superficie viscosa das follas captura po e filtran o aire.

No campo da temperatura, durante o inverno, as pantallas formadas polas árbores perennes reducen as perdas de calor dos edificios e impiden a acumulación de neve. No estío, a superficie da herba e das follas absorben a radiación e o seu proceso de evaporación pode arrefriar a temperatura do ar. Pero, por riba de todo, as árbores proporcionan unha sombra xenerosa na estación adecuada. Esta característica converte ás árbores de folla caduca en especialmente apreciados cando se atopan preto dos edificios, xa que unha das condicións necesarias para o control solar é a de non interferir a radiación

solar durante o inverno. As parras tamén constitúen outro elemento moi importante no control solar durante o tempo caloroso (OLGYAY, V. 1963).

A localización exacta das árbores e da vexetación pode determinarse segundo a súa sombra usando un transportador. A sombra proxectada das árbores debe cubrir o contorno máis exposto no período cálido.

Na primeira hora da mañá e na tardiña o sol pasa moi baixo, polo tanto as árbores proporcionan o seu maior beneficio cando se colocan nos lados sueste e suroeste. Cando o sol se atopa nunha posición baixa, os seus raios producen unha sombra moi alargada que protexen de forma eficaz os lados do edificio que, doutra forma, sería moi complicado salvagardar. Ao mediodía o sol atópase no alto e os seus raios poden ser facilmente interceptados cun beiril; a esta hora do día as árbores situadas no extremo sur non representan un elemento moi efectivo porque a súa sombra queda proxectada moi preto deles mesmos.

3.9.4 Dificultades do método

Nas consideracións anteriores o recorrido do sol interpretouse coma un movemento ininterrompido na bóveda celeste, comezando e rematando na liña do horizonte. Na realidade rara vez ocorre isto, polo xeral, sempre haberá obstrucións. Poden ser producidas por obxectos inalterables tales coma as montañas ou os edificios construídos anteriormente, ou por obxectos que poden sufrir cambios. É interesante aplicar os conceptos aprendidos anteriormente coma o trazado da liña do horizonte.

3.9.5 Pasos do método

Se se desexa utilizar un perfil de sombra para o proceso do deseño é preciso, en primeiro lugar, determinar os períodos (as horas e as estacións) e a dirección (orientación e altitude) na cal se necesita sombra (OLGYAY, V. 1963).

3.9.5.1 Paso 1

Recoller datos dos cambios de temperatura diarios durante un ano no lugar. Aquelas temperaturas que caen fora do límite da zona de confort definirán o período de sobre quentamento.

3.9.5.2 Paso 2

Determinase a necesidade de sombra en función da posición do sol cun diagrama de recorrido solar.

3.9.5.3 Paso 3

Mediante métodos xeométricos é posible debuxar un perfil de sombra para calquera elemento (Figura 30). Utilizando un transportador, débúxase a proxección da sombra dun elemento na bóveda celeste, ao tempo que se determina o perfil de sombra dos obxectos lindeiros.

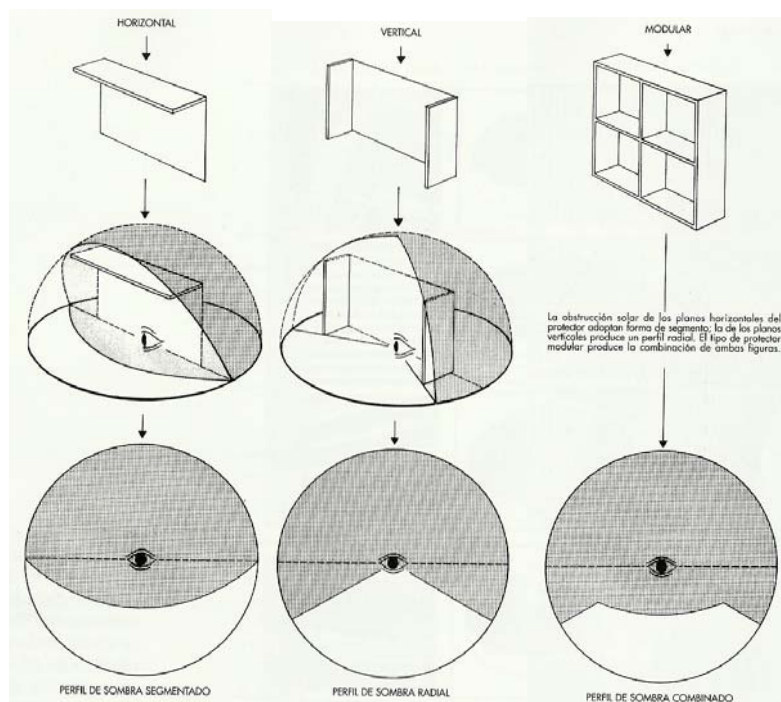


Figura 30. Perfil de sombra dos distintos protectores (Fonte: OLGAY, 1963)

3.9.5.4 Paso 4

Se superpoñemos os perfís dun elemento protector ao diagrama do recorrido solar e ao período cálido sinalado, obteremos as horas nas cales dito elemento interceptará os raios do sol.

3.10 Efectos do vento

3.10.1 Análise do vento

Os movementos favorables do ar débense utilizar para arrefriar durante épocas calorosas e como alivio en aqueles períodos nos que os valores de humidade absoluta son moi altos. Pola contra, os movementos de aire deberanse bloquear ou evitar durante o tempo frío.

3.10.2 Elementos protectores do vento

Non é posible alterar o movemento das grandes masas de ar se está producido por diferenzas de presión nel, non obstante, é posible controlar, ata certo punto, a velocidade do aire cando se move a nivel do solo. A vexetación baixa e a obstrución producida pola presenza de árbores orixinan desviacións no fluxo do aire que poden ser moi beneficiosas. Un elemento protector do vento, segundo a descrición de BATES C.G.(1944), desvía as correntes de ar cara arriba e, mentres volven para varrer de novo o solo, crea unha superficie preto do mesmo que permanece en calma relativa. A parte máis protexida

desta área atópase situada a sotavento e bastante próxima ao corta ventos; a medida que nos afastamos do mesmo aumenta a exposición ata o punto no que as correntes de aire acadan a súa máxima velocidade.

O tipo de elemento usado exerce un efecto determinante no modelo do aire resultante e na área protexida. As barreiras sólidas contra o vento orixinan remuíños na parte superior, o cal reduce a súa eficacia. En xeral, tres bandas con maior densidade e grosor proporcionarán unha maior protección. Aínda que o corta ventos de vexetación non acada as maiores obstrucións do vento si que é certo que orixinan un área de protección máis extensa que calquera das outras formas de protección.

3.10.2.1 Efectos do contorno ambiental adxacente sobre as edificacións

O contorno inmediato que rodea as construcións de baixa altura exerce unha acción determinante tanto nos modelos como nas velocidades do vento. Os elementos de deseño paisaxístico que inclúen materiais vexetais poden crear zonas de baixa presión arredor das vivendas dependendo das súas aberturas. Débese ter especial coidado na distribución dos mesmos, de forma tal que non bloqueen as brisas refrescantes durante os períodos cálidos; a plantación débese deseñar para dirixir e acelerar os movementos favorables de aire cara o edificio.

Nas figuras ilústranse algunhas das observacións obtidas por WHITE (1945). Nelas móstrase o efecto producido sobre o modelo de aire interno por unha sebe mediana situada tanto preto coma lonxe do edificio. A masa das follas das árbores bloquea o paso do aire, orixinando, como consecuencia, un incremento da velocidade do aire que pasa directamente por baixo. Tamén se ilustra o efecto producido por unha árbore de 9 m de altura cunha copa de 7,6 m de ancho e 1,5 m por riba do nivel do chan, sobre os patróns de fluxo, así coma o efecto producido pola combinación de árbore e sebe. Nas seccións o modelo fluiría de forma convencional mentres que na outra sección a corrente de ar desviada cara arriba, por efecto das árbores, producirá unha corrente de retorno no edificio. O efecto direccional das sebes nos modelos de movemento do aire ilústrase con dous exemplos. Se se colocan barreiras protectoras nun ou dous lados do edificio, a sotavento, a presión orixinará movementos de ar no interior da construción (Figura 31).

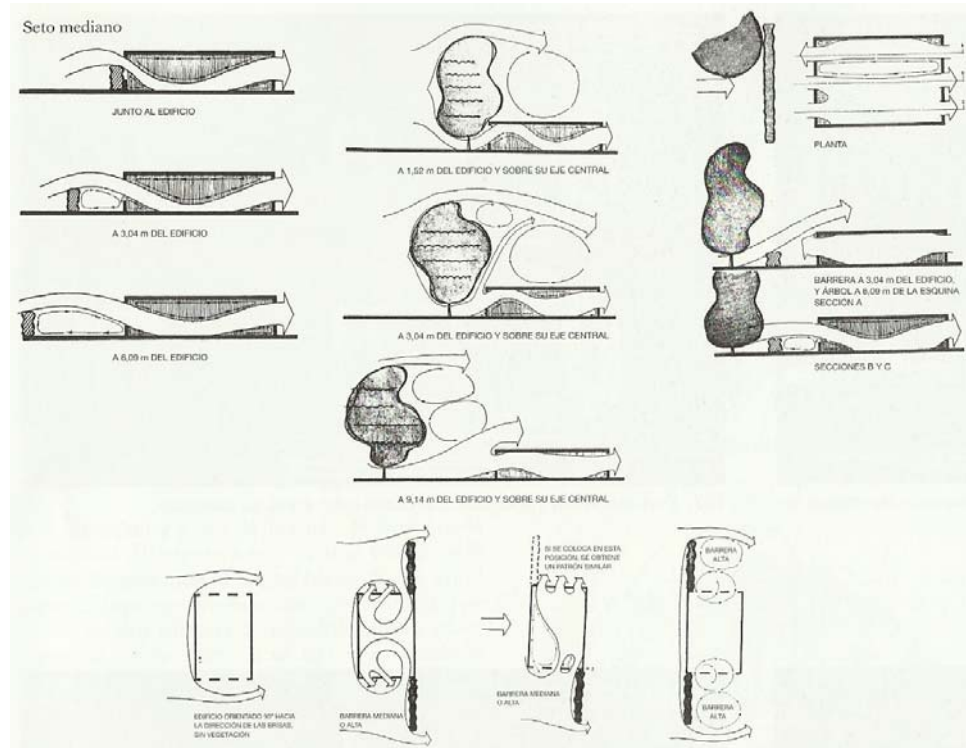


Figura 31. Modificación do vento polo paisaxismo (Fonte: WHITE, 1945)

3.11 Modelos de fluxo de ar no interior dos edificios

3.11.1.1 Ventilación producida polas forzas do vento

Unha vivenda situada nunha corrente de aire diminúe a velocidade do mesmo e acúmalo no seu lado máis exposto, orixinando un área de presión relativamente alta. O movemento do aire que rodea unha edificación crea zonas de baixa presión nos lados adxacentes á fachada de maior exposición. A sotavento prodúcese unha zona de sombra de vento con baixa presión. Esta sombra de vento encherase de ar gradualmente, de xeito que, a unha distancia aproximada do dobre da altura do edificio, o aire atópase en repouso. A partir de aí, e fluíndo cara e desde o edificio, o vento recuperará a súa velocidade orixinal a unha distancia de aproximadamente sete veces a altura da construción. Os modelos de movemento de ar creados arredor da vivenda veñen determinados pola xeometría da edificación e son independentes da velocidade do vento. A sección vertical do modelo de vento é similar á envolvente mostrada nos gráficos, onde os signos positivos e negativos indican as zonas de altas e baixas presións (Figuras 32 y 33).

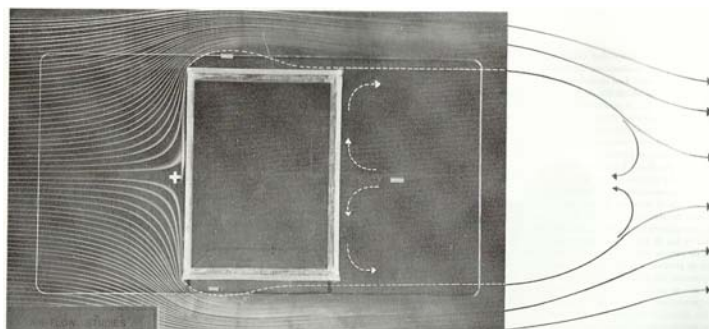


Figura 32. Modelo do movemento de ar arredor dun edificio (OLGYAY, 1963)

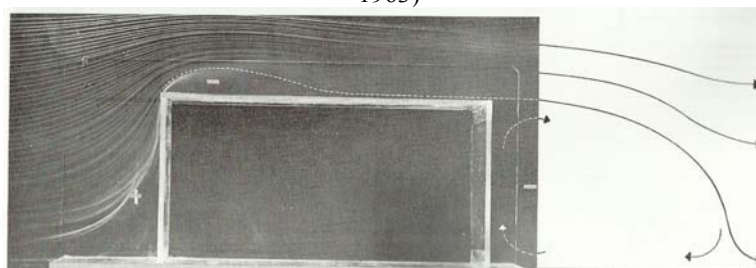


Figura 33. Modelo de movemento de ar na sección dun edificio (OLGYAY, 1963)

O emprazamento de aberturas é máis eficaz se se colocan as entradas nas zonas de alta presión e as saídas nas de baixa. A proporción de intercambio de aire atópase rexida polas diferenzas de presión e pola eficacia das aberturas expostas.

3.11.1.2 Características do movemento de aire

É obvio que non se producirá movemento de ar no interior naquelas construcións que non teñan saídas. De xeito similar, resulta evidente que grandes aberturas situadas en extremos opostos e colocadas nas zonas de alta e baixa presión, respectivamente, proporcionarán o máximo intercambio de aire no interior do espazo. Pola contra, no período de verán, a velocidade do aire é máis importante que a cantidade de ar intercambiado. Utilizando pequenas aberturas de entrada, prodúcese o efecto "Venturi", asegurando velocidades máximas do aire no interior da construción. Nos debuxos incrementáanse as liñas de velocidade no interior do edificio que no exterior.

3.11.1.3 Efecto inercia

Para presións externas iguais, unha entrada e unha saída colocadas simetricamente darán coma resultado un modelo de fluxo interior perpendicular. Con aberturas situadas de forma simétrica, en concordancia con diferentes compoñentes de presión externa, o ar penetrará no edificio oblicuamente. O fluxo interior tenderá, por inercia, a seguir a súa dirección orixinal ata que, debido ás diferenzas de presión, se desviará cara a saída.

Sempre que se intercepte unha das presións externas orixinaranse patróns de fluxo asimétricos similares.

3.11.1.4 *División no interior da vivenda*

Os modelos de fluxo interior dependen das aberturas, manténdose independentes de calquera outra característica xeométrica da habitación. Un fluxo directo asegura a rapidez do movemento de ar, e calquera cambio na súa dirección diminuírá dito efecto. Calquera cambio brusco no seu curso, xa sexa ocasionado polo mobiliario, o equipamento ou algunha división, diminuírá a velocidade do aire de xeito moi destacable. Como consecuencia, ao deseñar a distribución das subdivisións internas deberase ter en conta o modelo de fluxo específico.

Se unha división se atopa fóra do camiño da corrente de aire, a cantidade e o modelo do fluxo permanecerán constantes. Se a mesma división se coloca na corrente, o fluxo interromperase e reducirá a súa velocidade, proporcionando un nivel de ventilación escaso en ambas estancias.

3.11.1.5 *Situación das aberturas de entrada e saída*

Un índice alto entre o tamaño das aberturas de entrada e das de saída asegura unha velocidade adecuada de vento. No modelo de fluxo de penetración de aire, o emprazamento das saídas é irrelevante, e a velocidade diminuírá soamente se os cambios de dirección consomen enerxía.

Se se pretende a maior eficacia do fluxo de ar coma elemento refrescante, a corrente deberá dirixirse cara a zona de actividade da vivenda.

3.11.1.6 *Características das aberturas de entrada*

Os factores externos situados preto das aberturas modifican os modelos de fluxo de ar. Un beiril situado no teito mellora o efecto da ventilación porque intercepta e desvía as masas de aire cara á abertura. Os beirís macizos enriba, directamente, da fiestra eliminan efectos producidos polas presións superiores provocando que o fluxo se desvíe cara o teito. Se o beiril tivera unha fendedura equilibraría as presións (Figuras 34,35 e 36).

As fiestras pivotantes na posición cara abaixo teñen efectos máis favorables que as que están abertas cara o teito.

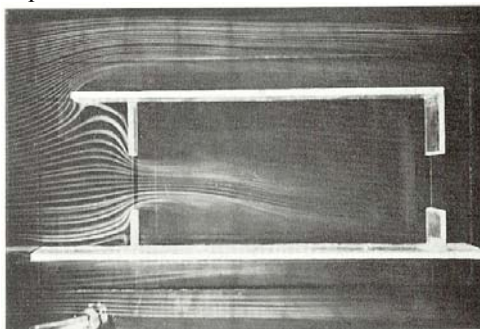


Figura 34. O beiril recolle correntes de ar (OLGYAY, 1963)

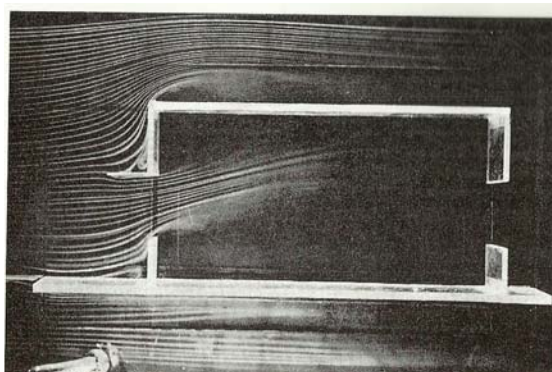


Figura 35. Beiril inmediato, efecto desfavorable (OLGYAY, 1963)

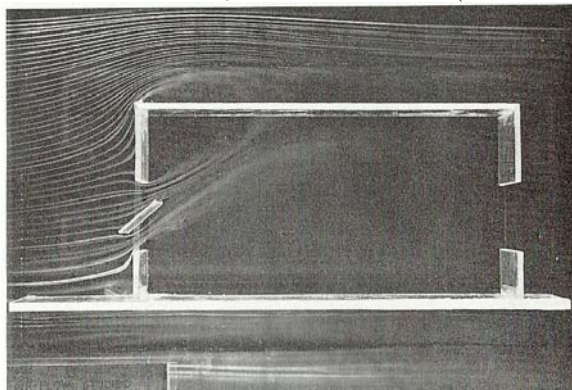


Figura 36. Persiana veneciana cara abaixo, fluxo correcto e ben dirixido (OLGYAY, 1963)

3.11.1.7 Ventilación por diferencial de temperatura

A existencia dunha diferenza de temperatura entre o aire interior e exterior do edificio orixina unha columna ascendente de aire quente debido ao efecto gravitacional sobre a diferenza de peso. A maior diferenza de temperatura, maior tamaño e diferenza de altura entre as aberturas de entrada e saída.

O intercambio de aire por gravidade é un dos motivos que inducen á utilización de teitos altos en ambientes calorosos. Os vestíbulos centrais e as xenerosas distribucións das escaleiras nos edificios de varias plantas situados ao sur, son o maior recoñecemento da existencia do efecto de acumulación. Tamén é moi recomendable ventilar os áticos e faiados.

Non obstante, a lentitude do aire nun ascenso normal, non é a adecuada para aliviar o efecto das altas temperaturas ou mellorar as incomodidades por condicións de alta presión de vapor. Cando isto ocorre é necesario usar a forza do vento.

4 Conclusións

O traballo comprace a necesidade dunha guía para a creación dunha vivenda en Galiza, baseada en como afecta o clima nos humanos e na correspondente arquitectura do fogar.

Co traballo exposto no manual procúrase dar axuda a quen precise un apoio á hora de crear un deseño dunha vivenda acorde e adaptada aos recursos enerxéticos da natureza de Galiza.

Referencias

- BARDOV, P. e ARZOUMANIAN, V. (1981) “Sol y Arquitectura”, Ed. Gustavo Gili
- BATES, C. G. (1944) “The Windbreack as a Farm Asset”, Washington
- BEDFORD, T. (1950), “Environmental Warmth and Human Comfort”, British Journal of Applied Physics
- CASTELAO (1920) “Soportales”, Galiza
- GEIGER, R., (1950) “The Climate Near the Ground”, Cambridge
- HUNTINGTON, E. (1927), “The Human Habitat”, Nueva Jersey
- LANDSBERG, H., (1947) “Microclimatic Research in Relation to Building Construction”, Architectural Form
- LEBENS, R. M. (1983) “Passive Solar Architecture in Europe”, Ed. The Architectural Press, London
- LEBRETON J. (1945) “La Cité Naturelle”, Paris
- MARBOUTIN, F. (1931) “L’Actinometre et l’Orientation des Rues et des Façades”, La Technique Sanitaire et Municipale
- MARTÍNEZ CORTIZAS, A., CASTILLO RODRÍGUEZ, F., PÉREZ ALBERTI, A., VALCÁRCEL DÍAZ, M. Y BLANCO CHAO, R. (1999), “Atlas Climático de Galicia”, Xunta de Galicia
- MAZRIA, E. (1983), “El libro de la Energía Solar Pasiva”, Ed. Gustavo Gili
- NEILA GONZÁLEZ, F. J. (2004) “Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible”, Ed. Munilla-Lería
- OLGYAY, VICTOR (1963), “Desing with climate”, Ed. Gustavo Gili
- PÉREZ ALBERTI, A. (1982) “Climatoloxía en xeografía de Galicia”, Ed. Sálvora
- WHITE, R. F. (1945) “Effects of Landscape Development on the Naturel Ventilation of Buildings and their Adjacent Area”, Texas Engineering Experiment Station

Introducción a las diferentes tecnologías de aprovechamiento de la energía solar directa

Rocío Mazón Hernández

*Depto. de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad
Politécnica de Cartagena*

1 Radiación solar

El Sol está compuesto mayoritariamente por hidrógeno y helio. En él se produce, de manera continua, un proceso nuclear de fusión por el que el hidrógeno se transforma en helio y se genera una gran cantidad de energía. Esta energía es emitida a todo el espacio en forma de radiación electromagnética ultravioleta, visible e infrarroja. Parte de esta energía nos llega directamente a la Tierra dado que la radiación solar es más o menos atenuada según la composición de la atmósfera que atraviesa por interacción de diferentes componentes atmosféricos:

La capa de ozono absorbe radiación ultravioleta, actuando como una pantalla de radiaciones perjudiciales para la vida terrestre.

Parte de la radiación es reflejada de nuevo al espacio.

Otra parte se atenúa en su choque con partículas y moléculas atmosféricas, fundamentalmente H₂O y CO₂.

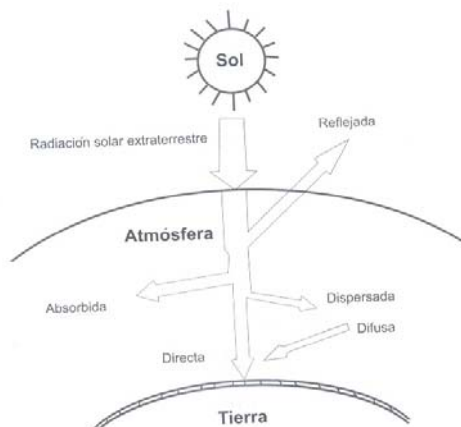


Figura 1. Atenuación de la radiación por la atmósfera.

Esta radiación que llega del Sol es la principal fuente de energía sobre la Tierra y, sin ella, no sería posible la vida. Toda energía disponible procede de forma directa o indirecta del Sol, salvo la nuclear, la debida a las mareas y la geotérmica. Para poner de manifiesto la enorme cantidad de energía procedente del Sol se calcula que la que nos llega a la Tierra en 10 semanas de intensidad solar media es equivalente a todas las reservas conocidas de combustibles fósiles. Además del empleo de la energía solar a través de los procesos naturales, es posible utilizarla convirtiéndola artificialmente en energía térmica y eléctrica para satisfacer las necesidades diarias en forma similar a la de las fuentes de energía más conocidas (petróleo, gas, carbón, hidroelectricidad o energía nuclear). El aprovechamiento de la energía solar con tecnologías muy simples fue realizado por el hombre desde sus comienzos; basta mencionar como ejemplos el sacado de carnes y frutas y el cultivo en invernaderos. El uso intensivo de esta fuente de energía requiere el empleo de una serie de tecnologías de conversión más elaboradas en los últimos 30 años y que todavía se encuentran en estado de evolución, fundamentalmente para disminuir sus costos.

La energía solar tiene dos características importantes: su condición de energía prácticamente inagotable y el hecho de ser no contaminante. Además, es una fuente de energía disponible, en mayor o menor medida, en cualquier parte del planeta, pudiendo ser colectada y transformada en el lugar de utilización. Esto último puede ofrecer ventajas económicas considerables, particularmente en áreas remotas y aisladas, para las cuales el costo de transporte de combustibles convencionales (derivados del petróleo y gas) o de distribución de electricidad pueden ser muy elevados.

Sin embargo, su utilización ofrece serias dificultades por su estacionalidad, su alternancia día-noche, su dependencia de otras condiciones atmosféricas, su baja densidad y, en muchas aplicaciones, su coste, que dista aún de ser competitivo con los combustibles fósiles. Es necesario, por lo tanto, captarla sobre superficies relativamente grandes y acumular la energía necesaria para su utilización en horas nocturnas o en períodos de menor insolación.

El recurso energético solar no puede ser cuantificado en la misma forma que los recursos energéticos convencionales (petróleo, gas, carbón, uranio...) donde pueden determinarse la cantidad de energía almacenada en los reservorios y extraíble periódicamente mediante tecnología dada. Debe tenerse en cuenta su característica de energía renovable, inagotable pero de disponibilidad cíclica y variable.

El Sol es la principal fuente primaria de energía, que puede ser usada directamente, en sistemas pasivos, así llamados porque no utilizan otra fuente de energía, o en sistemas activos, que usan otra fuente de energía, generalmente eléctrica, empleada para mover el fluido calefactor.

1.1 Aprovechamiento de la energía solar

Parte de la radiación solar que llega a nuestro planeta es colectada y convertida en otras formas de energía por el gran sistema termodinámico formado por el conjunto Tierra-atmosfera; la energía eólica, hidráulica o la energía disponible a través de procesos de bioconversión, son ejemplos de los productos de ese proceso natural de conversión. Por ello esta radiación solar que llega a la Tierra es la responsable de la gran mayoría de las energías renovables que la naturaleza ha dispuesto al servicio del hombre.

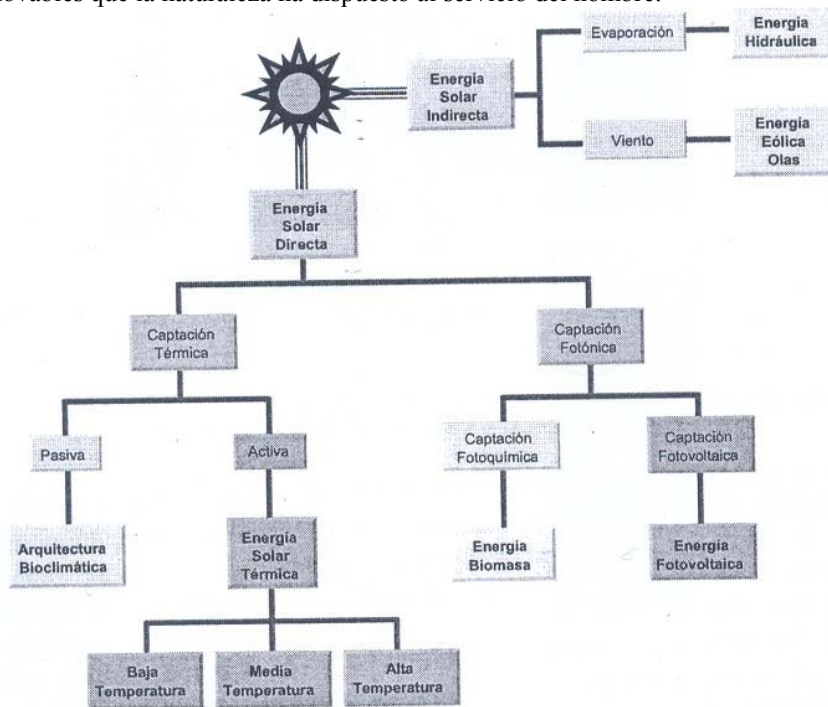


Figura 2. Utilización de la radiación solar.

La radiación solar que llega a la Tierra, se puede aprovechar sin sufrir ninguna modificación natural, a través de colectores solares y convertirla en alguna forma de energía para su utilización directa. En general se clasifica a

los colectores solares de acuerdo con el proceso de conversión: fotovoltaica y fototérmica. La primera convierte directamente la energía solar en energía eléctrica y la segunda, convierte la energía solar en energía térmica a diferentes temperaturas según el tipo de colector que se utilice. Ambos tipos de aprovechamiento directo de la energía solar se presentarán a continuación.

2 Energía solar fotovoltaica

Con el término fotovoltaico se designan distintos fenómenos y tecnologías que permiten la conversión directa de la energía de la radiación solar en energía eléctrica mediante el empleo de dispositivos llamados células solares.

Aunque el efecto fotovoltaico fue descubierto por el francés Edmund Becquerel en 1839, no fue hasta 1941 cuando se fabricó la primera célula solar de selenio en la que se conseguía una eficiencia del 1%. Desde entonces se han ido produciendo importantes avances, impulsados inicialmente por la carrera espacial, que han hecho de la tecnología fotovoltaica una tecnología madura y fiable. Los rendimientos en células especiales de laboratorio, y bajo radiación concentrada, han llegado a alcanzar valores superiores al 30% y la tecnología del silicio monocristalino se ha convertido en la tecnología líder consiguiendo rendimientos de hasta el 17% sin concentración en células comerciales.

En la actualidad, se trabaja en nuevas tecnologías buscando la reducción en los costes, que siguen siendo relativamente elevados para competir con la energía eléctrica producida por centrales térmicas.

Gran parte de la población mundial que no disfruta de los beneficios de la energía eléctrica, vive en zonas rurales no electrificadas caracterizadas por una gran dispersión y bajas densidades de población. En estas zonas no resulta económicamente rentable la extensión de la red eléctrica, siendo la solución fotovoltaica una solución interesante especialmente para instalaciones de poca potencia que suelen ser las más demandadas. Esta es una de las razones por la que la energía fotovoltaica cumplirá un importante papel en la electrificación de zonas rurales y en la universalidad del acceso a la energía eléctrica y a los servicios que esta proporciona.

2.1 Célula fotovoltaica. Tecnologías de fabricación

Los materiales más frecuentes utilizados en la fabricación de las células son de tipo semiconductor, concretamente de silicio, de manera que una célula convencional no es sino un diodo especialmente diseñado para aprovechar con la máxima eficacia la energía de los fotones que incide sobre su superficie.

Cuando la célula solar se expone a la luz del Sol se hace posible la circulación de electrones y la aparición de una corriente eléctrica entre las dos caras de ésta. La corriente eléctrica generada en la célula fotovoltaica es corriente continua (C.C.). La tensión de trabajo (voltaje) depende de las características físico-químicas propias del material de construcción. Como se ha mencionado, el silicio es el material base de las células, pero existen otros elementos y compuestos con capacidad de ejercer de semiconductores en

células fotovoltaicas que producen tensiones de trabajo distintas como se presentará posteriormente.

Hasta la fecha, la mayor parte de las células y módulos fotovoltaicos que se encuentran en explotación, en instalaciones de uso terrestre, emplean silicio. Por consiguiente la tecnología de fabricación de células de silicio es una tecnología madura, bien desarrollada y fiable, pero que exhibe un grado de complejidad elevado, requiere en muchos de sus procesos equipos de tecnología muy avanzada y precisa de un aporte energético importante.

El procedimiento de fabricación de células de silicio mono o policristalino es esencialmente el mismo y comprende las siguientes etapas básicas:

- Obtención del silicio de grado metalúrgico.
- Purificación del silicio.
- Crecimiento de los cristales de silicio.
- Producción de las obleas de material semiconductor de base.
- Ataque químico y texturización.
- Formación de la unión.
- Colocación de los contactos metálicos.
- Tratamiento antirreflexivo.

Existen comercializadas en el mercado diferentes tipos de células de silicio en función de su estructura cristalina:

Silicio monocristalino: todos los átomos están perfectamente ordenados. En el proceso de cristalización al ir depositándose los átomos sobre el cristal ya formado lo hacen siempre respetando el mismo orden. El color que presentan es muy monocromático; azulado, oscuro y con un cierto brillo metálico.

Silicio policristalino: formado por la agrupación de cristales de silicio donde las direcciones de alineamiento de los átomos cambian cada cierto tiempo durante el proceso de deposición. Tienen el aspecto de una amalgama de cristales de distintos tonos azulados y grises con brillo metálico.

Silicio amorfo: en donde ha desaparecido la estructura cristalina ordenada y el silicio se ha depositado formando una capa fina sobre un soporte transparente. El aspecto es de tonos color marrón y gris oscuro.

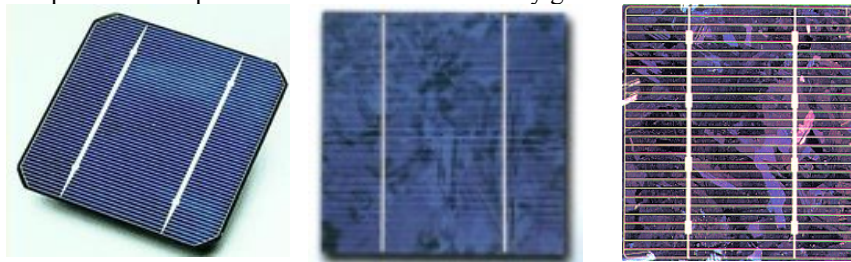


Figura3. Células de silicio monocristalino, policristalino y silicio amorfo

El rendimiento o eficiencia en la transformación de energía radiante en energía eléctrica por unidad de superficie expuesta es similar para las células de silicio monocristalino y policristalino y está alrededor del 16%, por el contrario es menor el del silicio amorfo que no supera el 10%.

2.2 Tipos de células fotovoltaicas

La tecnología de elaboración de celdas solares está basada en uniones íntimas entre semiconductores monocristalinos, policristalinos y amorfos, como el silicio (Si), telurio de cadmio (CdTe). Cobre-indio-selenio (CuInSe₂), arseniuro de galio (GaAs). Dependiendo del tipo de semiconductor se pueden elaborar células solares en película delgada, del orden de 1 μm de espesor o gruesas, del orden de cientos de micra.

2.2.1 Células de lámina delgada

El principal motivo por el que las células de silicio cristalino tienen un espesor que podría considerarse grande es el debido a que este material se comporta como un semiconductor indirecto, lo que implica un relativamente reducido coeficiente de absorción de la luz incidente y consecuentemente la necesidad de un espesor considerable para reducir las pérdidas por transmisión. Células de un espesor más reducido, denominadas de lámina delgada pueden ser fabricadas si se emplean otros materiales semiconductores de tipo directo o si se incorporan procedimientos de confinamiento óptico en células de silicio cristalino. Las células de lámina delgada que han sido de mayor atención y que se encuentran en el mercado son:

- Silicio amorfo (eficiencia 8-10%)
- Arseniuro de galio (eficiencia 25%)
- Teluro de cadmio (eficiencia 10%)
- Diseleniuro de cobre e indio (células CIS) (eficiencia 17%)

Las células de capa delgada suscitan, desde hace mucho tiempo, el interés de los investigadores. Nuevos materiales como el CIS y el CdTe constituyen hoy día una promesa que parece sólida, y hay grandes compañías en fase de iniciar una fabricación que se espera sea de mayor éxito que las células de Si-a, una vez aprendidos de los errores que aquella industrialización prematura trajo consigo.

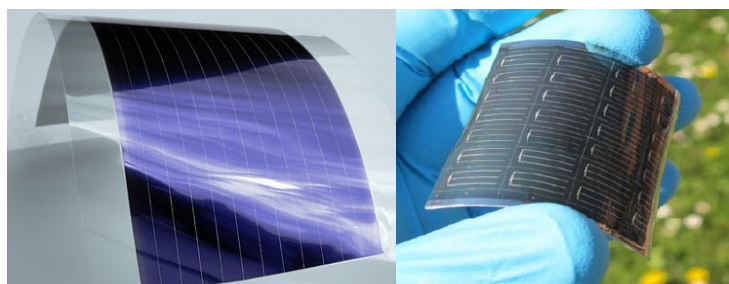


Figura 4. Células fotovoltaicas de lámina delgada.

2.2.2 Células Tandem

El hecho de que en células con una sola unión se hayan alcanzado rendimientos muy elevados comparados con sus límites teóricos, supone que existe ya poco margen para mejorar su eficiencia. En cambio, se pueden conseguir notables incrementos de rendimiento con células multiunión o tandem con las que se lleva a cabo un mejor aprovechamiento de la energía

contenida en todo el espectro solar. En esta línea, con células reales de dos uniones se ha logrado una eficiencia del 35% y con células de tres uniones podría llegarse teóricamente hasta un 50%. En esencia, la idea es la de superponer células fabricadas con diferentes semiconductores para conseguir una gran adaptación al espectro solar, de suerte que, fotones que no son energéticamente eficientes para una, lo son para la otra y fotones que tendrían un importante exceso de energía en una célula son absorbidos por la otra. Una combinación que ha dado buenos resultados es la de GaAs y GaSb, con el rendimiento del 35%.

2.3 El Sistema Fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico consta de tres elementos principales, el *panel* o campo de paneles, el *regulador* de carga y la *batería o acumulador*. Los paneles son responsables de generar Energía eléctrica, la batería de almacenarla y el regulador de que la batería funcione de manera óptima. Es importante recordar que los paneles y los baterías de un sistema fotovoltaico trabajan en corriente continua, si el rango de tensión de operación de tus equipos no incluye la tensión de operación de la batería será necesario utilizar algún tipo de convertor. Si los equipos que quieres alimentar utilizan otra tensión de continua diferente a la de la batería será necesario el uso de un convertor y si alguna de los equipos trabajan en corriente alterna necesitarás un inversor.

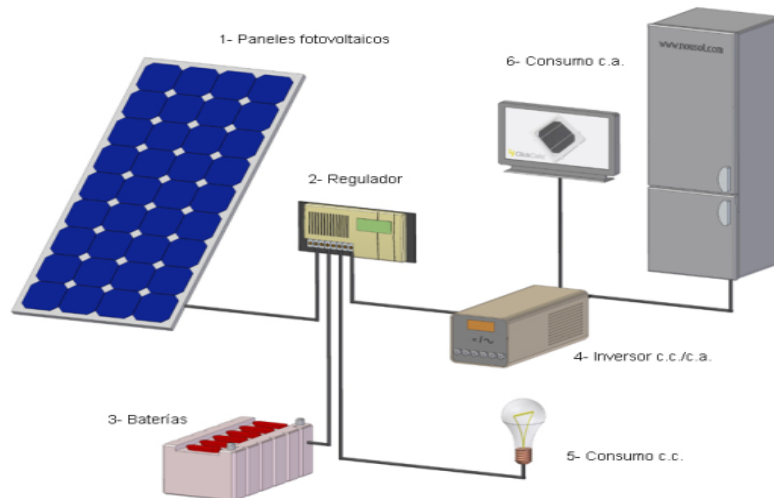


Figura 5. El sistema fotovoltaico.

2.3.1 El panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico está formado por un conjunto de células fotovoltaicas interconectadas entre sí. Éstas se encapsulan y enmarcan mediante el sellado por la capa posterior con un encapsulante polimérico de EVA (etilenvinilacetato) y un recubrimiento, también plástico, de Tedlar, y por la anterior con un vidrio templado, muy resistente al impacto, de superficie antirreflexiva y con un bajo contenido en hierro para limita su

absorbancia, la superficie exterior del vidrio debe ser lisa para evitar la acumulación e incrustación de suciedad y para facilitar la limpieza por efecto de la lluvia, el marco que le da rigidez al conjunto es de aluminio anodizado, y en ocasiones, lacado. La hermeticidad del módulo es esencial para impedir la penetración de los agentes atmosféricos que favorecería la corrosión y deterioro de los contactos metálicos. En la parte posterior se fija la caja de conexiones con tapa estanca que contiene los bornes positivo y negativo.

2.3.2 La batería o acumulador

Se encarga de almacenar la energía producida por los paneles que no se consume inmediatamente para disponer de ella en periodos de baja o nula irradiación solar. La acumulación se realiza en forma de energía eléctrica mediante el uso de baterías, usualmente de plomo-ácido, salvo en los casos en los que el generador fotovoltaico. Los acumuladores electroquímicos como las baterías de plomo-ácido también cumplen dos importantes misiones:

- Suministrar una potencia instantánea superior a la que el campo de paneles puede generar, necesaria para la puesta en marcha de algunos elementos (por ejemplo, el motor del frigorífico).
- Determinar el margen de tensiones de trabajo de la instalación.

2.3.3 El regulador de carga

Asegura que la batería funcione en condiciones apropiadas, evitando la sobrecarga y sobredescarga de la misma, fenómenos ambos muy perjudiciales para la vida de la batería. El procedimiento que utiliza para ello es determinar el estado de carga de la batería a partir de la tensión a la que ésta se encuentra.

A partir de este parámetro y el conocimiento del tipo de tecnología que se usa en la batería se controla la entrada y salida de corriente en la misma. El regulador puede incluir otros elementos que, aunque no sean imprescindibles, realizan útiles tareas de control o seguridad: amperímetros, voltímetros, contadores de amperios-hora, temporizadores, alarmas, etcétera.

2.3.4 El convertidor

La electricidad que proporciona el sistema paneles-acumulador es continua, y se extrae a una tensión determinada, lo cual no siempre coincide con las exigencias de los equipos de consumo. Un convertidor continua-alterna (las siglas en inglés (DC/AC), permite alimentar equipos que funcionen con corriente alterna. Si fuese necesario también se pueden usar convertidores continua-continua (en inglés, DC/DC) que transformen la tensión continua de las baterías en tensión de alimentación también continua pero de distinto valor. A la hora de diseñar un sistema de comunicaciones que usa energía fotovoltaica es recomendable que todas las cargas trabajen a la tensión que suministran las baterías evitando el uso de convertidores.

2.3.5 Los equipos de consumo o cargas

Son los equipos que se conectan al sistema y que consumen la energía del mismo (equipos de comunicaciones inalámbricas, enrutadores, estaciones de

trabajo, iluminación, TVs, etcétera.). Aunque no es posible saber con certeza absoluta cuál va a ser el consumo total de dichos equipos en operación es vital, para un cálculo correcto del sistema, hacer una buena estimación del mismo. Asimismo, hay que tener cuidado en elegir equipos eficientes, para no derrochar energía. Por ejemplo, en escenarios donde sea necesario dimensionar equipos de comunicaciones por energía solar debemos considerar equipos basados en arquitecturas de bajo consumo.

2.4 Instalaciones fotovoltaicas y aplicaciones

Ya se ha visto que el componente básico de la tecnología fotovoltaica es la célula fotovoltaica y que varias conectadas entre sí constituyen un módulo fotovoltaico. La potencia de los módulos varía dentro de un amplio intervalo. Sin embargo, un gran número de aplicaciones requieren potencias mayores de las que puede suministrar un único panel, por lo que se hace necesario conectar un determinado número de módulos para poder satisfacer las necesidades de una instalación.

Si bien es cierto que las instalaciones fotovoltaicas pueden ser clasificadas en función de muy diversos criterios, la clasificación genérica más extendida es la que agrupa a las instalaciones fotovoltaicas dentro de dos categorías, atendiendo a la posibilidad de estar o no conectadas a una red de distribución eléctrica pública.

2.4.1 Instalaciones autónomas de la red eléctrica

En éstos, la energía eléctrica producida se utiliza para pequeños consumos, situados en el mismo lugar (o en sus cercanías) de la instalación. Las aplicaciones más comunes son:

- Electrificación de viviendas alejadas de la red eléctrica
- Aplicaciones agrícolas y ganaderas: bombeo de agua, sistema de riego, eliminación de invernaderos y granjas...
- Señalización y comunicaciones: navegación aérea y marítima, señalización de carreteras, repetidores de telecomunicaciones...
- Iluminación pública de calles, monumentos, paradas de autobuses...
- Sistemas de depuración de aguas

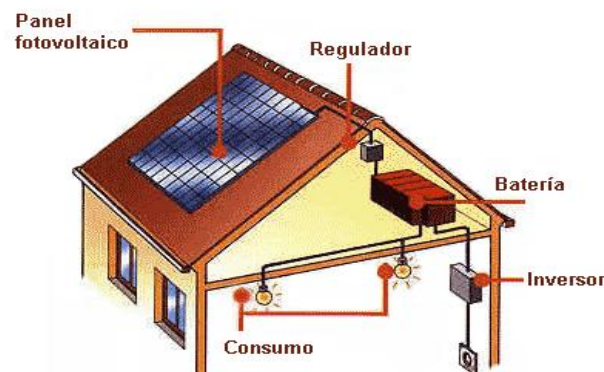


Figura 6. Sistema fotovoltaico aislado.

En estas instalaciones a fin de poder disponer de electricidad durante la noche o en períodos de poca insolación, se hace necesaria la acumulación de energía eléctrica mediante baterías, con el correspondiente regulador de carga. Estos sistemas deben dimensionarse adecuadamente para satisfacer la totalidad de las necesidades energéticas, a menos que se disponga de un sistema de apoyo convencional.

2.4.2 Instalaciones conectadas a la red eléctrica

En estas instalaciones, una fracción o la totalidad de la energía eléctrica producida se entrega a la red eléctrica. La diferencia entre la energía entregada por la instalación a la red eléctrica y la que consume la instalación fotovoltaica, es facturada a un precio reglamentariamente establecido o pactado.

Una instalación conectada a la red eléctrica tiene menos componentes que una instalación autónoma, debido, fundamentalmente, a que no se precisa de un sistema de almacenamiento de energía (baterías) ni, en consecuencia, de un regulador. En efecto, en estas instalaciones, la energía eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos pasa directamente al inversor, que la transforma y entrega como corriente alterna, a la red. Se distinguen dos tipos de aplicaciones principales:

- Centrales fotovoltaicas, en las que toda la energía producida se inyecta a la red eléctrica.
- Sistemas integrados en edificios, donde la energía producida satisface una parte de la demanda eléctrica del edificio en las horas de gran consumo y la energía sobrante en las horas de menor consumo se vende a la red eléctrica. En este tipo de instalaciones es muy importante que la instalación quede bien integrada en el edificio. El objetivo que se persigue en estas instalaciones en edificios es el aprovechamiento de las posibilidades arquitectónicas que ofrecen los tejados y las fachadas para instalar captadores fotovoltaicos y reducir la compra de energía a las redes eléctricas convencionales.

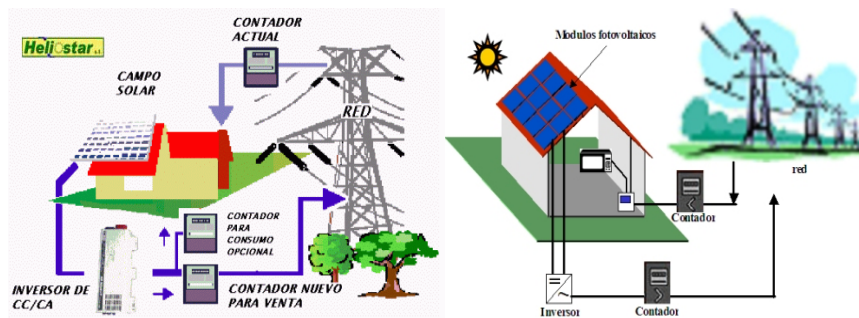


Figura 7. Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

3 Energía solar térmica

La energía solar térmica aprovecha la energía de la radiación solar para generar calor y utilizarlo en distintas aplicaciones. La captación térmica puede ser pasiva, en la que no existen elementos en movimiento y es vinculada a elementos arquitectónicos o estructurales (arquitectura bioclimática), y en la captación térmica activa un fluido de trabajo transita por el colector o los sistemas de captación experimentan algún tipo de movimiento, en ellas se utilizan diferentes sistemas de captación, clasificados según se utilicen para producción de energía térmica a alta, media o baja temperatura, siendo este último el sistema de mayor aplicación y los más desarrollados comercialmente.

3.1 Energía solar térmica pasiva

La energía térmica pasiva consiste en la captación de la radiación solar mediante dispositivos en los que se calienta un objeto material donde se almacena energía. Además, no existen elementos ni fluidos en movimiento, ni colectores propiamente dichos, o bien están integrados como elementos arquitectónicos.

La arquitectura solar pasiva está orientada fundamentalmente a cubrir las necesidades de calefacción y refrigeración de los edificios mediante técnicas que aprovechen al máximo las potencialidades de la radiación solar y demás variables climáticas. Este tipo de aprovechamiento solar, utiliza la orientación, acristalamientos, masas térmicas, reflectores, paneles de convección... Es la utilización más antigua de la energía solar y que está adquiriendo gran importancia en arquitecturas actuales (construcciones bioclimáticas).

Un buen aprovechamiento de la energía solar depende de los componentes, aspectos de diseño de un edificio con los que se permite calentar y/o enfriar el edificio prescindiendo de elementos pasivos. Los principales aspectos arquitectónicos de diseño a tener en cuenta son:

- Ubicación, situación y orientación
- Techos y suelos
- Ventanas y perforaciones
- Paredes y asilamiento

3.1.1 Sistemas captadores

Son aquellos componentes de un edificio que tienen por objeto captar la energía de la radiación solar y transferencia al interior en forma de calor. Existen los denominados sistemas directos, en los que la energía penetra directamente en el interior, a través de superficies variadas. Los sistemas semidirectos son en los que se interpone un espacio entre el interior y el exterior, con una gran entrada de radiación (generalmente un invernadero). La gran radiación incidente es absorbida en este espacio, aumentando mucho la temperatura respecto del exterior y calentando por conducción y convección. Por último, en los sistemas indirectos la captación se realiza a

través de un elemento de almacenamiento de gran capacidad térmica, con una posterior transferencia de energía al interior.

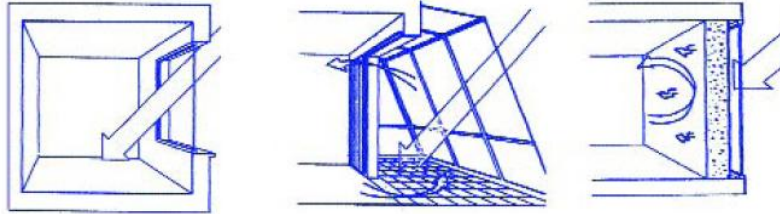


Figura 8. Sistemas directos, semidirecto y muro invernadero.

Podemos distinguir los denominados muro invernadero como superficie de acumulación vertical constituida por un material de alta densidad, protegida por un vidrio y acabada en color oscuro. El calor pasa a través del muro por conducción y se cede al interior por radiación y convección. Un caso particular es el muro trombe, al que se añaden unas perforaciones superiores e inferiores que comunican con el interior. Gracias a ellas se aumenta y se controla la cesión de calor por termocirculación en el circuito de aire resultante.

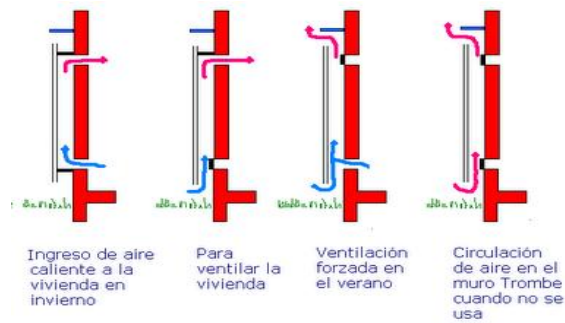


Figura 9. Diferentes usos del muro trombe.

Con trampillas manuales o automáticas se evita la circulación invertida durante la noche. También podemos encontrar el muro de agua, formado por contenedores de agua, donde se acumula la energía que luego es transferida hacia el interior.

Sistemas similares se utilizan en tejados, utilizando una masa acumuladora en la cubierta del edificio, al igual que también se utilizan sistemas indirectos por el suelo, captando y almacenando la energía en un depósito debajo del suelo del interior. El aporte radiante se realiza por un lateral del acumulador orientado al sol.

3.1.2 Sistemas de inercia

Son aquellas partes del edificio que actúan como estabilizadores de las temperaturas interiores, frente a las oscilaciones exteriores, reduciendo los efectos del frío en invierno y del calor en verano. Estos sistemas de inercia pueden ser subterráneos, aprovechando la inercia térmica de la tierra, se entierra total o parcialmente el edificio. Tanto en el interior como en las cubiertas también se pueden disponer de elementos de gran capacidad

térmica (materiales de construcción, recipientes de agua...) que produzcan un amortiguamiento en las oscilaciones de temperatura.

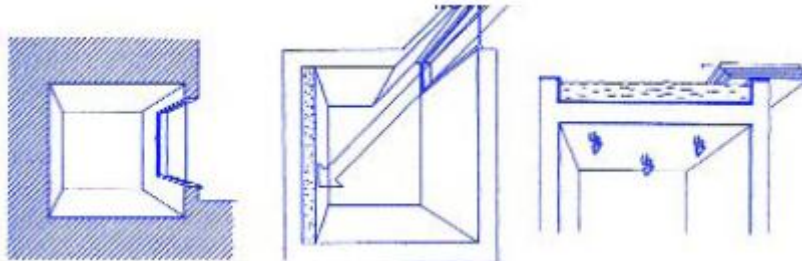


Figura 10. Sistemas de inercia subterráneos, interior y en cubiertas.

3.1.3 Sistemas de ventilación

Tienen por función primordial facilitar la circulación del aire a través del edificio, y tratarlo para mejorar sus condiciones de temperatura y humedad. Estos sistemas se caracterizan por el caudal de aire que penetra y sale del edificio, ya que renuevan el aire interior y generan una sensación de enfriamiento sobre sus ocupantes.

Los sistemas más utilizados, que generan el movimiento de aire interior del edificio favoreciendo la entrada y salida por aberturas colocadas a tal fin, son la ventilación forzada, el efecto chimenea y la cámara o chimenea solar. Todos ellos permiten la ventilación aprovechando el viento exterior, colocación estratégica de rejillas, el calentamiento del aire y aumento de densidad.

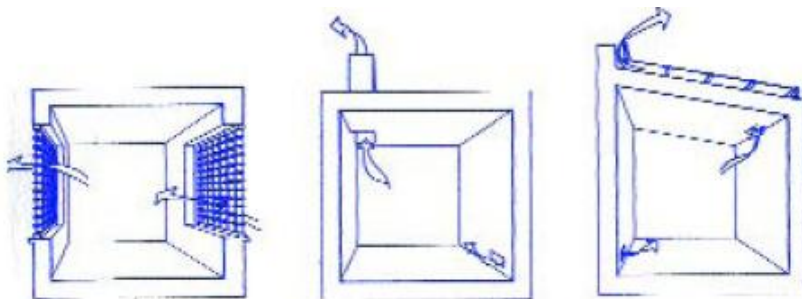


Figura 11. Ventilación cruzada, efecto chimenea y cámara o chimenea solar.

3.1.4 Otros sistemas

Existen muchos otros componentes de edificios que se utilizan para cubrir las necesidades energéticas requeridas en el interior. Elementos como voladizos, persianas, toldos, lamas, vidrios de colores... detienen la radiación solar directa, permitiendo la ventilación y entrada de luz. En climas cálidos-secos se aconseja disponer de sistemas de tratamiento del aire, actuando sobre la temperatura y humedad, favoreciendo la evaporación del agua en una corriente de aire. Para ellos se utiliza la aspiración estática, torres evaporativas, ventilación subterránea...

3.2 *Energía solar térmica activa*

La energía solar térmica activa aprovecha directamente la energía emitida por el sol transformándola en calor utilizable. Utilizan elementos de captación de la energía solar específicos, llamados captadores o colectores solares, por el interior de los cuales circula un fluido (normalmente agua o aire) que absorbe la energía irradiada por el sol. Dependiendo de la temperatura final alcanzada por el fluido a la salida, las instalaciones térmicas activas se clasifican en: térmica de baja, media y alta temperatura.

3.2.1 Energía solar térmica de media y alta temperatura

Las aplicaciones solares se consideran de media temperatura cuando las temperaturas de trabajo se sitúan entre 100 y 400°C. Por encima de esta temperatura, hasta por encima de los 1000°C, funcionan las instalaciones solares de alta temperatura. Estos sistemas se suelen utilizar en ciclos de potencia alimentados por energía solar. Las centrales termosolares para producción de electricidad o aplicaciones químicas, implican siempre diseños de sistemas de concentración.

Los tres tipos de concentradores solares más utilizados son:

3.2.1.1 *Colectores cilindrico-parabólico*

Su función consiste en concentrar la radiación recibida en una amplia superficie, sobre un único tubo receptor. Para ello se utiliza una superficie reflectante con forma de parábola, de manera que todos los rayos recibidos en la dirección paralela al eje de la parábola, se reflejarán sobre el foco de la misma. En el foco de la parábola se sitúa el receptor de la radiación, normalmente constituido por un tubo metálico recubierto por una imprimación absorbente y rodeado por una cubierta concéntrica de vidrio para favorecer el efecto invernadero y reducir las pérdidas.

Con el fin de disponer los rayos solares siempre paralelos al eje de la parábola, el equipo dispone de un sistema de seguimiento solar sobre un solo eje. Basculando de arriba hacia abajo, según la altura solar en cada momento. Estos equipos se utilizan para producción de vapor o agua a alta temperatura. Concentran la radiación de 30 a 80 veces y se producen potencias por campo unitario de 30 a 80 MW eléctricos.

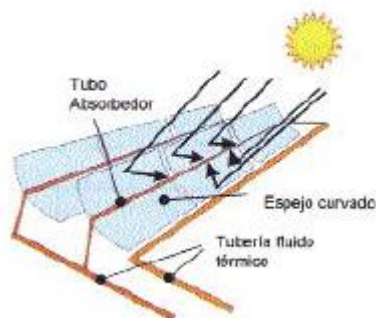


Figura 12. Concentradores cilindro-parabólicos.

3.2.1.2 Discos parabólicos

Tienen un principio de funcionamiento similar al de los cilindro-parabólicos. En este caso, la superficie reflectante forma un paraboloide, con lo que su foco es un solo punto. La geometría de estos equipos obliga a disponer de un sistema de seguimiento solar con dos ejes de giro, de manera que el haz de radiación solar, se disponga siempre de manera paralelo al eje del paraboloide. Se suelen utilizar para la producción de energía eléctrica mediante un motor Stirling situado en el foco. Los niveles de concentración son los más elevados (1000-4000) y las potencias unitarias son de 5 a 25 kW.

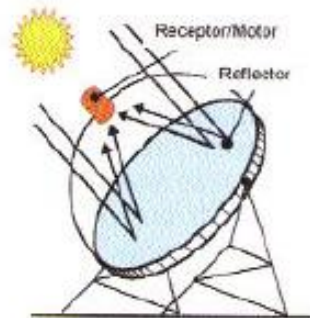


Figura 13. Discos parabólicos.

3.2.1.3 Centrales torre

Una central solar térmica de torre viene a ser un gigantesco paraboloide descompuesto en un campo de helióstatos. Los helióstatos son estructuras reflectantes, de gran superficie, cuya misión es reflejar, constantemente, la energía captada sobre un receptor situado encima de una torre. Para ello disponen de un sistema de seguimiento solar sobre dos ejes de giro: elevación y acimut. A través del receptor circula nuestro fluido caloportador, alcanzando temperaturas muy elevadas, en algunos casos, superiores a 1000°C. Los órdenes de concentración son de 200 a 1000 soles y las potencias de 10 a 200 MW eléctricos.

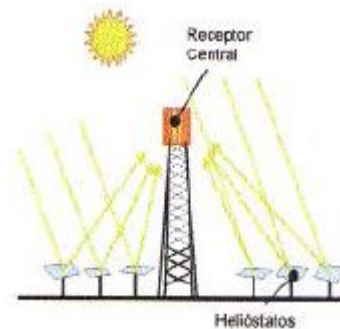


Figura 14. Receptor en torre o central.

3.2.2 Energía solar térmica de baja temperatura

Se considera energía solar térmica de baja temperatura aquella que trabaja por debajo del punto de ebullición del agua (100 °C a la presión atmosférica). Para aprovecharla se utilizan elementos captadores diseñados a tal efecto. Los tipos de captadores más habituales son los siguientes:

3.2.2.1 *Captador plano o de placa plana*

Es el sistema más utilizado. Está compuesto por una superficie absorbedora unida a un emparrillado de tubos por los que circula el fluido caloportador. En ocasiones, en lugar del emparrillado, se dispone de un único tubo con meandros. En cualquier caso, tanto tubos como superficie absorbedora se encuentra cerrada y aislada en una caja cubierta con un vidrio para favorecer el efecto invernadero y reducir las pérdidas de la ganancia solar.



Figura 15. Captador solar de placa plana.

La superficie absorbedora es la parte fundamental del colector solar. Su misión es absorber la máxima cantidad de la radiación que le llega. La superficie sobre la que inciden los rayos solares debe ser convenientemente tratada para aumentar al máximo la energía absorbida (alta absorbancia), reduciendo al mínimo la emisión de energía de los tubos al exterior (baja emitancia). El emparrillado de tubos (normalmente de cobre) o conductos (suelen ser de aluminio) por los que circula el fluido que debe ser calentado (denominado fluido caloportador, que usualmente es agua glicolada).

El colector plano presenta una cubierta transparente que tiene por objeto reducir las pérdidas, creando un efecto invernadero, así como proteger de la intemperie la superficie absorbedora. Normalmente son de vidrio con bajo contenido en hierro (para limitar su absorbancia) y de un espesor superior a 4 mm.

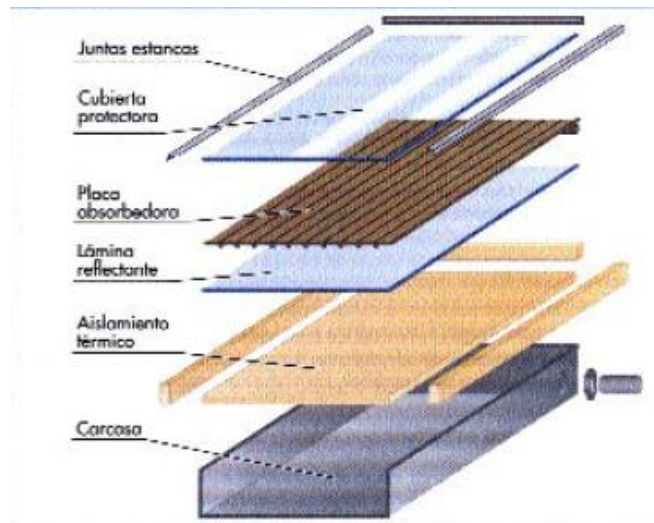


Figura 16. Elementos del colector plano.

El colector debe incorporar materiales aislantes tanto en el fondo, bajo la superficie absorbente, como en los laterales, con el fin de reducir las pérdidas de calor desde el absorbedor hacia la carcasa. Los materiales más usados son la lana de roca, fibra de vidrio, espuma rígida de poliuretano y poliestireno expandido.

Una carcasa es la que recoge el resto de los componentes del colector, dándole la rigidez y estanqueidad necesarias al conjunto. Aunque también puede ser de material plástico (sufriendo un rápido deterioro), suele ser metálica (aluminio o acero inoxidable). Finalmente las juntas permiten la estanqueidad entre la cubierta y la carcasa, pudiendo ser de caucho o silicona que soporte alta temperatura.

3.2.2.2 Captador de tubos de vacío

Consta de una serie de tubos de vidrio sobre los que se ha hecho un vacío de aire, en el interior de los cuales se encuentran los tubos de cobre por los que circula el fluido caloportador (normalmente agua glicolada). El hecho de que no haya aire entre los conductos de cobre y la cubierta de vidrio, reduce de manera considerable las pérdidas globales, por eliminación de las pérdidas originadas por la convección de este aire. Con este tipo de colectores se pueden conseguir temperaturas del orden de 80 a 100 °C.



Figura 17. Captador solar de tubos de vacío.

3.2.2.3 Captador heat-pipe o de tubos de calor

Similar al de tubo de vacío, basa su funcionamiento en un bulbo de cobre, herméticamente cerrado, por el que circula un fluido característico a una presión determinada. El punto de fusión de este fluido se encuentra a una temperatura elevada. De esta manera, la radiación solar eleva su temperatura hasta transformarlo en vapor, que asciende hasta una zona en la que entra en contacto con el fluido caloportador de nuestro sistema solar, al que cede su energía, calentándose el fluido y condensando el vapor a líquido, que desciende de nuevo para cerrar el ciclo.

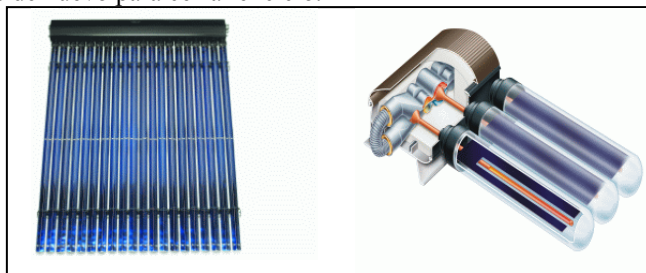


Figura 18. Captador heat pipe y detalle constructivo.

3.2.2.4 Captador de polipropileno

En ocasiones, cuando el sistema solar está diseñado para una época estival y la temperatura que se requiere no es demasiado alta (alrededor de 30°C), se utilizan colectores sin aislamiento. En este caso, los tubos del colector son de goma (polipropileno), actuando ellos mismo como absorbentes. Su aplicación más habitual es el caldeo de piscinas exteriores en verano (zonas frías, piscinas a la sombra o ampliación de la temporada de baño).

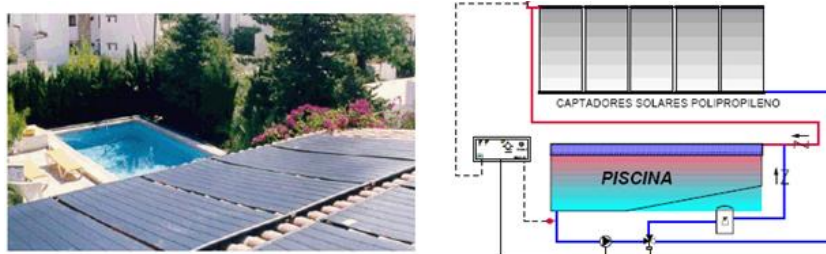


Figura 19. Catadores de polipropileno.

3.2.3 Tecnologías y principales componentes de los sistemas térmicos

Dentro de los sistemas solares de baja temperatura, podemos distinguir diversas aplicaciones, pudiendo, varias de ellas, confluir en una misma aplicación. Estas aplicaciones son:

- *Agua Caliente Sanitaria (ACS)*: Tanto en el sector residencial, como en el terciario: hoteles, hospitales, instalaciones deportivas, etc.
- *Calefacción*: En instalaciones de suelo radiante o con radiadores.
- *Calentamiento de piscinas*: Tanto en piscinas cubiertas como abiertas.
- *Refrigeración*: Utilizando una bomba de absorción que, alimentada por el agua calentada por los colectores, produce agua a baja temperatura.
- *Otras aplicaciones industriales*.

Los principales elementos que constituyen la instalación solar térmica de baja temperatura son los siguientes.

- *Sistema captador*: Constituido por el conjunto de colectores debidamente conexiónados. Son los receptores de la radiación solar, a través del fluido caloportador, que normalmente es agua.

- *Sistema de acumulación*: Debido a los ciclos día-noche ocasionados por el movimiento de rotación de la Tierra, y dado que el momento de utilización de la energía no tiene por qué coincidir con las horas en las que calienta el Sol, se hace necesario un sistema de acumulación. Este sistema está compuesto por uno o más depósitos (según el tamaño de la instalación) conectados al sistema captador, del cual reciben el agua caliente. Por regla general tienen una disposición vertical para favorecer la estratificación térmica (aguas calientes arriba – aguas frías abajo). Deben disponerse, debidamente calorifugados, en alguna sala cerrada, con el fin de reducir las pérdidas.

- *Sistema de intercambio*: En muchas ocasiones, cuando el tamaño de la instalación es considerable, o cuando la calidad del agua así lo recomienda (aguas duras), interesa hacer pasar por el sistema captador un fluido diferente del agua de utilización final. En estos casos el fluido caloportador es agua tratada con anticongelantes (glicoles), que circula por un circuito primario entre el sistema captador y un sistema de intercambio térmico. Otro circuito secundario, ya utilizando agua de la red, se encargará de recuperar esta energía del intercambiador de calor hasta los depósitos de acumulación, y de éstos, hasta su utilización.

- *Sistema de energía auxiliar:* Todas las aplicaciones de energía solar requieren un sistema de apoyo que utilice una energía auxiliar. En efecto, las instalaciones solares no se diseñan para suministrar el 100 % de las necesidades a partir de la radiación recibida del Sol, sino que, en algunos meses de utilización, se requerirá otra energía (electricidad, gas natural, propano, etc.) para completar la demanda.

- *Sistema hidráulico:* Todo sistema solar constituye una instalación hidráulica en sí misma. Lo ideal es concebir, en fase de diseño, un circuito hidráulico de por sí equilibrado. Si no fuera posible, el flujo debe ser controlado por válvulas de equilibrio (manuales o automatizadas). En caso de instalación para agua caliente sanitaria, el circuito hidráulico del sistema de consumo deberá cumplir los requisitos especificados en la normativa de aplicación.

- *Sistema de control:* Es un dispositivo clave para el correcto funcionamiento de la instalación. Evitará someter sus equipos a determinadas condiciones extremas que puedan provocar averías. También tiene por objetivo optimizar el rendimiento global de la instalación, automatizando la operación de válvulas y bombas. Operará teniendo en función de la complejidad de la instalación, y de la disponibilidad y demanda de energía en cada momento. En general funciona recibiendo datos de diferentes sensores térmicos y de presión (termostatos y presostatos), procesando la información y actuando sobre los elementos activos: válvulas y bombas.

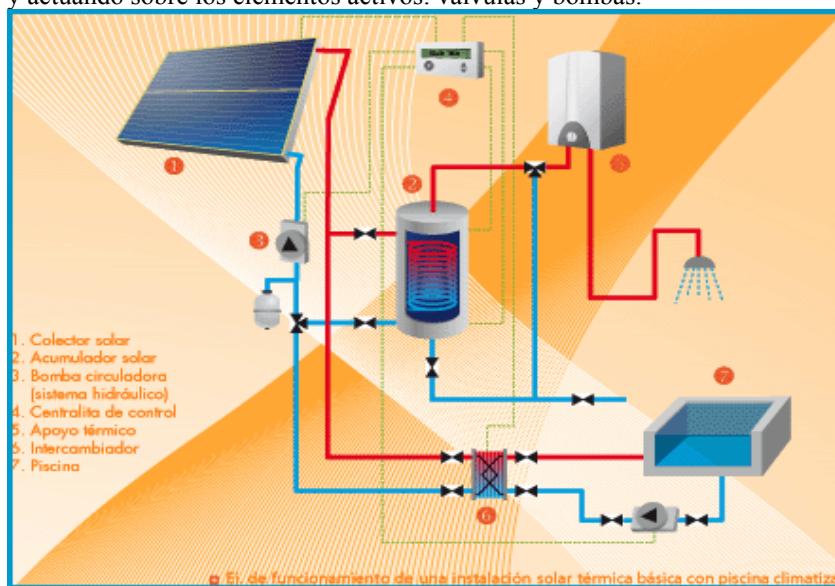


Figura 20. Principales componentes de un sistema solar térmico.

Referencias

- Mario Ortega Rodríguez. Energías renovables. Thomson Paraninfo. 2007
 M. Ibáñez Plana, J.R. Rosell Polo, J.I. Rosell Urrutia. Tecnología solar. Ed. Mundi Prensa. 2004

Walther García Casai, Pablo Docampo Rey. Guía práctica de energía solar. Ed. CAT y Colegio de Arquitectos de Galicia. 2006

José M. Fernández Salgado, Vicente Gallardo Rodríguez. Energía solar térmica en la edificación. Ed. A. Madrid Vicente. 2004

<http://argem.es/solartermica>

<http://daeeecologica.iespana.es/introduccion%20termic>

Nuevos desarrollos en captación fotovoltaica

Ramón Ordás Badía

Consejero Delegado Silicio FerroSolar. Grupo Ferroatlántica.

1 Introducción

Como es bien conocido, la preocupación por el cambio climático, así como por el incremento de los precios de los combustibles fósiles y los elevados grados de dependencia energética de los países desarrollados, junto a importantes desarrollos tecnológicos en los últimos 15 años, han venido fomentando el desarrollo de fuentes renovables de energía y en particular el uso de la energía solar fotovoltaica.

Los principales componentes de un sistema fotovoltaico, FV, son: las células (que convierten la energía del sol en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico que ocurre en materiales semiconductores), los módulos (constituidos por un gran número de células, habitualmente 60 o 72 células) y los inversores (que se utilizan para convertir la electricidad generada en una forma adecuada para el uso diario).

En los sistemas aislados además se requiere un sistema de almacenamiento, como una batería (generalmente de tipo plomo-ácido para almacenar la energía de uso posterior) y un controlador de carga, para proteger a las baterías de las descargas o sobrecargas y para proporcionar información sobre el estado del sistema o permitir la medición y el prepagado de la electricidad utilizada.

Existen distintos tipos de materiales semiconductores: Si, Ge, AsGa, CuInS₂, TeCd, etc. En la actualidad, el silicio es el más usado para la

fabricación de células FV. Aunque muy abundante en la corteza terrestre no aparece en estado libre sino en forma de óxido, como en el cuarzo, las amatistas o el ópalo, o como silicatos en el granito, la arcilla o la mica. La materia prima para su obtención es la sílice, óxido de silicio (SiO_2), que se somete a varios procesos de purificación, hasta la obtención de silicio de grado semiconductor (policristalino) con una pureza de 99,999999%.

2 Tecnologías solares fotovoltaicas

La primera generación de células fotovoltaicas se basa en el empleo del silicio como material semiconductor, silicio cristalino (Si-c) que se utiliza en dos modalidades: monocristalino, (Si-sc), y multicristalino, (Si-mc).

En el proceso de fabricación del Si-mc se utiliza silicio de menor calidad y coste que en la producción de Si-sc, no obstante la diferencia de eficiencias entre las células de Si-sc y de Si-mc es relativamente pequeña. Este tipo de células son las que dominan el mercado.

La escasez de silicio en el mercado por su utilización en la industria electrónica y el alto coste del proceso de fabricación, aspectos que llegaron a provocar una importante crisis en el sector fotovoltaico en 2008, impulsaron dos líneas de trabajo:

- El desarrollo de una nueva generación de células fotovoltaicas (células de lámina delgada –que se ha dado en llamar segunda generación- y otras nuevas tecnologías de célula, todavía en estado de I+D – que sería la tercera generación-). Entre los materiales semiconductores utilizados en las células de segunda generación se incluyen: el seleniuro de cobre e indio (CuInSe_2 o CIS), el diseleniuro de cobre, indio y galio (Cu(InGa)Se_2 o CIGS), el telurio de cadmio (CdTe), el arseniuro de Galio (GaAs) y el silicio amorfo (Si-a). Entre las células de tercera generación se incluyen las células solares orgánicas (poliméricas), las células de Grätzel o DSSC (del inglés Dye-sensitised Solar Cell), las células de banda intermedia, cristales fotónicos en materiales semiconductores III-V, como GaAs e InP y sus aleaciones, o las denominadas de generación por múltiple excitación (MEG, Multiple Excitation Generation) entre otras.
- La obtención de silicio por vías más económicas. Esta vía, impulsada por las empresas fabricantes de silicio metalúrgico, pretende fabricar silicio de grado solar por una vía diferente de la tradicional. Actualmente, la mayor parte del silicio utilizado en el sector fotovoltaico no proviene directamente de la sílice, si no que procede de la depuración del silicio metalúrgico 98,5% de pureza a través del conocido como método Siemens que obtiene silicio de pureza 9 noves (99,999999 %) a través de un complejo proceso que persigue la deposición del silicio después de producir triclorosilano, como se puede ver en la figura 1.

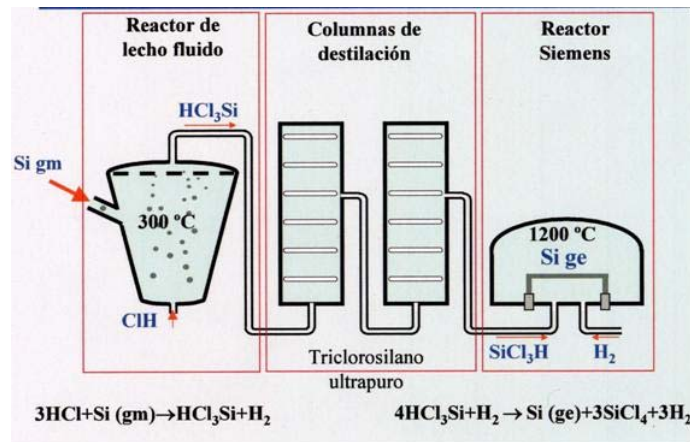


Figura 1. Método Siemmens de producción de silicio.

Por el contrario, la vía metalúrgica pretende depurar el silicio metalúrgico por métodos puramente metalúrgicos, como puede ser la adición de escorias. Varias empresas han anunciado el éxito en este trabajo, pero solamente la empresa noruega Elkem (ahora propiedad de la china Bluestar) y la española Ferroatlántica han conseguido obtener resultados en esta vía, aunque con notables diferencias en sus planteamientos. Las principales dificultades han venido de la depuración del Boro, del Fósforo y de los metales que el silicio metalúrgico posee.

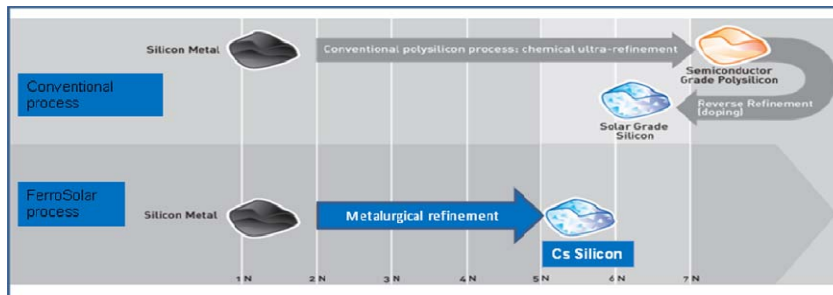


Figura 2. Producción metalúrgica de silicio.

2.1 Nuevas generaciones de células solares fotovoltaicas

Los módulos de Si-a parecían ser ideales para ser integrados en componentes de la edificación y en la actualidad alcanzan valores de eficiencia superiores al 10%, pero muy inferiores a los de las de células solares de Si-c. Las células CIS y las de TeCd tienen una degradación inferior a las de Si-a y un rendimiento mayor, pero tienen como inconveniente el uso de materiales altamente tóxicos y de poca abundancia en la corteza terrestre.

Entre las tecnologías FV de segunda generación cabe destacar otros desarrollos, entre ellos: las células de arseniuro de Galio (GaAs) -con un alto grado de absorción, incluso mayores que las del silicio- y las células

multiunión (apilación de células solares con distintos espacios de banda), ambas con gran potencial para su aplicación en los sistemas de concentración. Estos sistemas incorporan elementos ópticos para concentrar la luz en la célula para maximizar la energía solar recibida y reducir la superficie receptora, aumentando la eficiencia de conversión y reduciendo costes, aunque aún no se encuentran en un nivel comercial.

Entre las células de tercera generación, las células solares poliméricas se caracterizan por un proceso de fabricación más barato y por aplicaciones más versátiles. Al estar constituidas por compuestos de carbono el material resultante es, a diferencia del silicio, ultrafino, ligero y flexible aunque tienen una menor eficiencia.

Las células DSSC aprovechan la combinación de un semiconductor nanoestructurado (TiO₂ en la mayoría de los casos) y un colorante orgánico para incrementar la potencia de captación de luz solar.

El Instituto de energía solar (IES) en colaboración con la Universidad de Glasgow ha fabricado células de banda intermedia usando puntos cuánticos de AsIn en una matriz de AsGa, pero el rendimiento aún es muy bajo.

Un nuevo material que se está investigando para la fabricación de células solares son los cristales fotónicos. En el Instituto de Microelectrónica de Madrid –IMM- fabrican cristales fotónicos en materiales semiconductores III-V, como GaAs e InP y sus aleaciones. En 2008, este grupo del CSIC patentó un nuevo tipo de célula solar con eficiencia de hasta un 30%, superior a las células solares convencionales.

Un nuevo concepto de células solares son las denominadas de generación por múltiple excitación (MEG, Multiple Excitation Generation). A finales del 2008, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) en colaboración con Innovalight anunció que el efecto MEG tiene lugar de forma eficaz en los nanocristales de silicio. Estos resultados pueden mejorar considerablemente la eficacia de conversión de las células solares convencionales.

Sin embargo, las células de silicio cristalino continúan dominando el mercado, y las previsiones son cada día mejores para ellas, puesto que han conseguido mejoras en eficiencias y reducciones de coste que les colocan lejos de la mayor parte de los otros tipos de células, exceptuando quizás las de CdTe, con los problemas particulares que presentan.

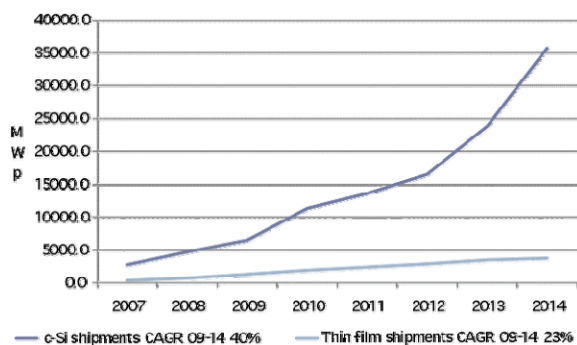


Figura 3.

2.2 Obtención de silicio de grado solar por la vía metalúrgica. El caso Ferroatlántica

Ferroatlantica nació en 1992 con la compra por el empresario español Juan Miguel Villar- Mir de la División de Ferroaleaciones de Carburos Metálicos que tenía 4 fábricas en España. Desde entonces ha ido comprando fábricas y empresas en Venezuela (FerroVen), en España (HidroNitro), en Francia (Pechiney Electrometalurgie al grupo Alcan con fábricas en Francia y Sudafrica), en Sudáfrica (Rand Carbide) y finalmente la fábrica de Manzhi en China. Hoy en día es el mayor productor mundial de silicio metal y una de las mayores empresas del sector de las ferroaleaciones con una facturación de más de 1.300 millones de euros y con más de 2.600 trabajadores. Es una empresa global donde el mercado español representa menos de un 30% de su cifra de negocio. Está trabajando en la construcción en Chin de la mayor planta del mundo de silicio metalúrgico.

Ferroatlantica I+D es la empresa que aglutina el I+D del Grupo y entre las tecnologías desarrolladas puede citarse el electrodo ELSA-composite, la máquina de colada continua y muchos otros desarrollos en los campos de la microsílíce, los inoculantes. Actualmente el principal proyecto es el de fabricación de silicio para las células fotovoltaicas, el denominado **proyecto FerroSolar**.

El proyecto FerroSolar se inició en el año 2000 como un proyecto de I+D para conocer las mejores posibilidades de depuración metalúrgica del silicio. Siempre se enfocó como un proyecto integrado en la fábrica de silicio metalúrgico de cara a obtener un nuevo producto, como se había hecho unos años antes con el mercado de las siliconas, y a que la propia fábrica se aproveche de todas las ventajas tecnológicas desarrolladas en el proyecto. Vamos a distinguir tres áreas principales en el proyecto.

2.2.1 Área del horno metalúrgico

Los hornos que se utilizan para la primera etapa del proyecto son los hornos normales de las fábricas de silicio metalúrgico. Consideramos que tenemos una buena tecnología de producción de silicio metal y queremos aprovechar este know-how para producir un silicio “especial” para el resto de las áreas del proyecto. En esta fase hemos trabajado mucho sobre las materias primas que siguen siendo cuarzo y reductores, pero hemos desarrollado sistemas de selección y mejora de estas materias primas que nos permiten hablar de cuarzos y reductores “especiales”. El hecho de tener fábricas en países como Sudáfrica, donde el reductor más utilizado es nuestro propio carbón vegetal, y en Europa donde son las hullas, nos ha permitido conocer y seleccionar las más adecuadas. Lo mismo ocurre con el cuarzo donde en España y Sudáfrica tenemos nuestras propias canteras y hemos desarrollado tecnologías específicas de selección y tratamiento y en Francia, donde se pueden experimentar otros tipos de cuarzo.

Tanto en el horno como en la zona de colada y depuración utilizamos algunos aditivos y tratamientos de gases. También es relevante el uso de refractarios y elementos que disminuyan al máximo todas las posibles contaminaciones de este silicio “especial”.

2.2.2 Área de depuración del silicio

El proceso FerroSolar consiste en refundir el silicio en hornos de inducción donde se realizan extracciones líquido-líquido mediante escorias sobre cuya fórmula y forma de utilización preferimos guardar secreto. El proceso es industrial, repetitivo y barato.

Actualmente Ferroatlantica tiene en su fábrica de Sabon (España) una planta piloto con hornos de inducción normales de 4 t de acero (que es algo más de 1 t de silicio) donde puede producir sobre 400 t de silicio de calidad solar al año. La planta piloto se puso en marcha a principios del 2009 y es explotada por la nueva sociedad "Silicio FerroSolar" que pertenece un 100% a Ferroatlantica S.L. Tenemos en proyecto la planta industrial en la misma fábrica de Sabon que prevé una producción de 4.000 t/año con una inversión de 60 Meuros y un anteproyecto en la fábrica de Ganzi (China) para producir 10.000 t/año de silicio calidad solar.

2.2.3 Área de limpieza y cristalización

Una vez obtenida la calidad química adecuada, el producto requiere eliminar los restos de los procesos metalúrgicos antes mencionados que se encuentran en forma de inclusiones y que pueden dar lugar a contenidos inadecuados de carbón y oxígeno en el silicio especial.

3 Mercado mundial fotovoltaico

El mercado solar FV tiene un volumen mundial aproximado de 30.000 € millones, con una potencia instalada acumulada superior a los 40.000 MWp. Las ventas de módulos FV se ubican en el orden de 15.000 MW al año con un fuerte crecimiento en los últimos años.

AÑO	GW
2008	5,5
2009	7,5
2010	12

Figura 4. Mercado mundial fotovoltaico.

El país líder en FV instalada es Alemania, y el área líder la Unión Europea que acumula más del 70% de esa potencia, sin embargo, el crecimiento esperado se concentra en Asia y en Norteamérica. En la producción de células y módulos FV el líder es sin lugar a dudas China que parece no tener límite en la cuota de mercado que sus empresas pueden alcanzar con una continua pérdida de mercado de las empresas europeas. En este momento, de las 10 mayores empresas del sector 9 son chinas.

Los sistemas FV a gran escala conectados a la red son el motor del auge actual de la energía FV, debido fundamentalmente a los incentivos de países desarrollados como: Alemania, España, Italia, Japón y EE.UU. Se espera que en los próximos años se produzca un importante crecimiento en el área de instalaciones domésticas y de medio tamaño en tejados de tipo industrial.

Uno de los principales obstáculos para el desarrollo del mercado FV ha venido siendo el coste de la electricidad producida por un sistema FV. Los resultados más recientes vislumbran un futuro prometedor: los costes requeridos para la inversión inicial se han reducido espectacularmente, los costes de explotación son bajos; se ha incrementado la fiabilidad y los tiempos de vida útil de los sistemas FV; y ha continuado la mejora de la eficiencia FV.

Todo esto ha derivado en una disminución de los costes de generación de energía FV: en los últimos años el coste de desarrollo e instalación ha disminuido de 16 \$/W (1992) a 7,6 \$/W (2007) y a 2,5 \$/W en la actualidad.

4 Previsiones futuras

Según los pronósticos de la Unión Europea, en 2020 se habrán instalado más de 100 GWp y para 2030 se estiman 300 GWp, lo que nos llevaría a que la FV podría cubrir más del 10% de la electricidad consumida en la UE. El Banco Mundial habla de que en 2030 la energía solar FV aportará entre el 8.9% y el 13,8% de la electricidad generada a escala mundial, la capacidad acumulada de los sistemas FV será de 1.864 GW, se producirán 2.646 TWh de electricidad, existirán 1.280 millones de clientes con conexión a la red, el potencial de creación de empleo acumulado se ubicará en 10 millones de puestos de trabajo, la reducción acumulada de emisiones de CO₂ será de 8.953 millones de toneladas de CO₂, el coste de la electricidad solar oscilará entre 7 y 13 € por kWh, y el valor del mercado será de 454.000 millones € al año.

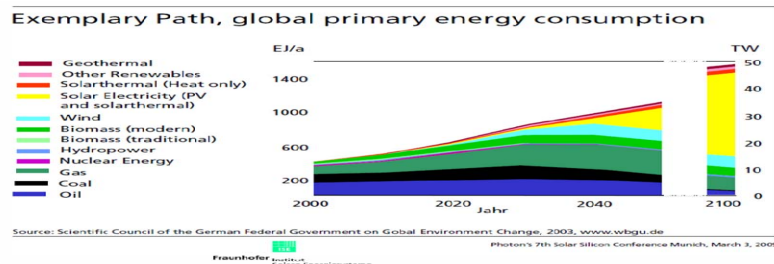


Figura 5. Previsiones futuras.

El continuo avance tecnológico nos traerá nuevas mejoras en eficiencia con temas como el doping engineering, nuevas arquitecturas de célula, reducciones en el espesor de las obleas, el uso de materiales tipo n y muchos otros frentes de investigación que están abiertos en este momento.

Referencias

R. Tronstad, A-K. Søiland and E. Enebak: **Specification of high quality silicon feedstock for solar cells**, Elkem Solar. In Workshop Crystalclear: Arriving at well-founded SoG silicon feedstock specifications, Amsterdam, 2008

R. Einhaus, et. Al: **PHOTOSIL – Simplified Production of Solar Silicon from Metallurgical Silicon**. In 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany

C. del Cañizo, A. Luque, J. Bullón, et. Al: **Integral procedure for the fabrication of solar cells on solar silicon**, Madrid, 2005

Roy Johnson; **Calisolar: Solar Cells Based on Smart Silicon**. In 8th Solar Silicon Conference 2010, Stuttgart

D. Macdonald and A. Cuevas: **Carrier recombination and transport in compensated silicon, and prospects for ‘compensation engineering**

Joseph Dietl: **Metallurgical route to solar-grade silicon**, In 8th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Florence, Italy, 1988

G. Beaucarne, C. del Cañizo, et.al.: **Solar cell process development in the european integrated project crystalclear**, In 23rd Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 2008

J. Kraiem, R. Einhaus, H. Lauvray: **Doping engineering as a method to increase the performance of purified silicon during ingot crystallization**, PVSC, 2009

D. Macdonald, A. Cuevas: **Carrier recombination and transport in compensated silicon, and prospects for ‘compensation engineering’**, NREL, 2009

Energía solar concentrada para generación de potencia: estado de la técnica y aplicabilidad a diferentes escalas

Rubén Abbas Cámara

*Departament d'Enginyeria Química. Universitat Rovira i Virgili. Institut
de Recerca de l'Energia de Catalunya - IREC*

1 Introducción

El término Energía Solar Concentrada para Generación de Potencia, proveniente de la nomenclatura inglesa mayormente utilizada, Concentrated Solar Power (CSP), no es del todo exacto, pues podría incluir también la generación mediante placas fotovoltaicas de alto rendimiento con previa concentración de radiación para minimizar el material fotovoltaico utilizado. Otros autores prefieren usar el término Energía Termosolar (Thermo Solar Energy), pero ello se podría confundir del mismo modo con placas termosolares para producción de agua caliente sanitaria, instaladas sobre

edificios ampliamente en múltiples países. Tal vez el término más exacto para definir esta tecnología sea el inglés Thermo Solar Power, que podría ser interpretado en castellano como Energía Solar Termoeléctrica, y que deja patente por un lado que se trata de generación de electricidad, y por el otro que se lleva a cabo a partir de energía solar térmica.

1.1 La radiación solar

La radiación emitida por el Sol tiene un valor prácticamente constante, con variaciones del 1% en ciclos de 22 años. Por ello el World Radiation Center estableció la constante solar, I_{SC} , con un valor de 1367 MW/m^2 , que equivale a la intensidad media de la radiación solar sobre la Tierra medida en una superficie normal al rayo incidente, y fuera de la atmósfera terrestre. El valor real de dicha radiación varía a lo largo del año en un $\pm 3\%$ debido a la órbita elíptica de traslación de la Tierra.

Una vez que la radiación entra en la atmósfera, el problema se hace más complejo (ver figura 2). Una parte de la radiación es reflejada en la misma atmósfera (principalmente por las nubes), otra es absorbida por la atmósfera, siendo posteriormente transformada en radiación difusa radiada en todas direcciones, y el resto llega como radiación solar directa, esto es, en la dirección del rayo incidente –salvando los procesos de refracción dados por diferencias de densidades–.

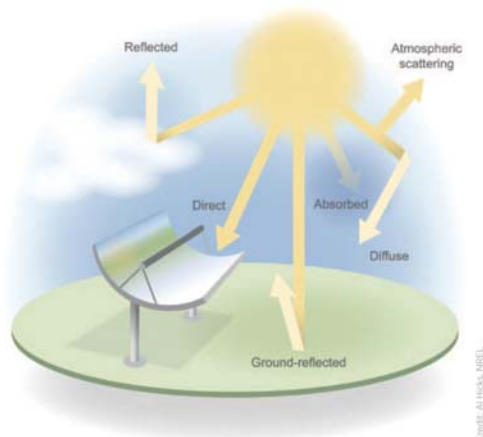


Figura 1. Componentes de la radiación solar resultantes de la interacción con la atmósfera (Adaptado de Stoffel *et al.* (2010)).

Es importante señalar que la radiación difusa no se puede concentrar, pues es emitida en todas direcciones. Así, dicha radiación puede ser usada para alimentar placas fotovoltaicas tradicionales y placas térmicas para producción de agua caliente sanitaria (alcanzando temperaturas de hasta 90°C), pero no para calentar un fluido térmico a temperaturas suficientemente altas como para generar electricidad en un ciclo termodinámico. De este modo resulta que, a la hora de localizar el asentamiento de una planta termosolar, se ha de observar la radiación directa incidente; este valor adopta valores máximos en zonas entre los dos trópicos (siendo así la superficie más perpendicular a la radiación) con climas desérticos (minimizando los procesos de reflexión y

absorción). En dichos lugares, la instalación de plantas termosolares resulta más económicamente rentable que la instalación de células fotovoltaicas (Quaschnig, 2004).

En la figura 3 se observa un mapa con la distribución de la radiación directa media, medida en kW/m^2 , que incide a lo largo de un día. Es de destacar que las zonas de máxima irradiación se dan a lo largo de los dos trópicos, donde se sitúan zonas desérticas como el Sahara, el Desierto de Sonora (México), y Australia.

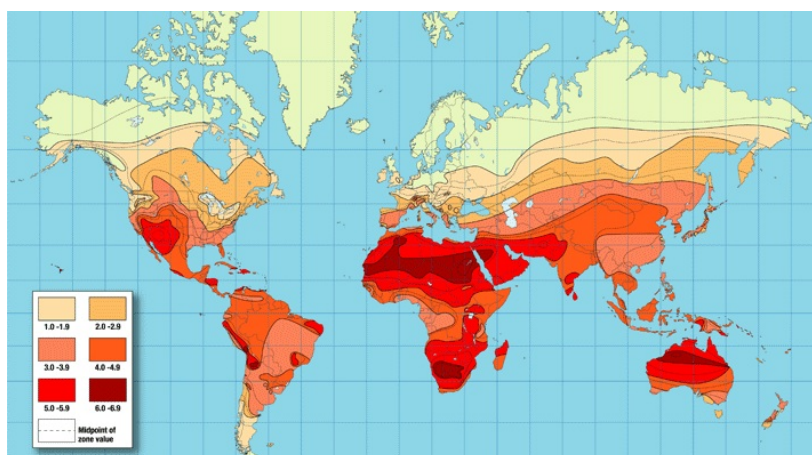


Figura 2. Mapa de radiación solar directa media a lo largo de un día (de <http://www.2oc.co.uk>).

Es de destacar la situación de España en este mapa, en el borde del llamado “Sun belt” o cinturón del Sol. Ello da condiciones suficientemente satisfactorias, si bien no idóneas, para la generación de electricidad mediante plantas termosolares, siendo las mejores dentro de Europa. Por otro lado, el Viejo Continente se encuentra relativamente cerca de las zonas más insoladas de la Tierra, en el Sáhara, lo cual ha llevado a la creación de la fundación Desertec; dicha fundación tiene el anhelo de instalar plantas termoeléctricas en el desierto con las que cubrir parcialmente las necesidades europeas. Se trata de un proyecto muy controvertido, pues si bien serviría para reducir drásticamente las emisiones de CO_2 asociadas a la generación de electricidad, no solucionaría el problema de la dependencia energética, e implicaría un “neocolonialismo”.

1.2 Principios de la solar termoeléctrica

La energía solar tiene un alto valor exergético, debido a que es originada en la superficie solar, a una temperatura equivalente a un cuerpo negro a 5777 K (Duffie, 1991); esto implica un rendimiento teórico superior al 93% en la generación de potencia mecánica mediante ciclos termodinámicos, o en la conversión en energía libre de Gibbs mediante reacciones químicas activadas por el Sol –por ejemplo, para generar hidrógeno–. Para alcanzar estos rendimientos habría que conseguir que el fluido de trabajo de un ciclo

Carnot, o los reactantes de la reacción química, alcanzasen temperaturas próximas a la de la superficie de sol.

Sin embargo, debido a la gran distancia entre el Sol y la Tierra, y a pesar de que la alta intensidad de la radiación en su origen –alrededor de 63 MW/m^2 –, su valor en la superficie terrestre es únicamente algo superior a 1 kW/m^2 . Esta intensidad no es lo suficientemente alta como para calentar un fluido térmico a temperaturas suficientemente altas y alimentar un ciclo termodinámico; por ello es necesario concentrar la radiación en una región, adoptando dicha concentración valores muy diferentes según la tecnología utilizada.

En la figura 3 se muestra un esquema general de una planta termosolar, en la que se distingue el concentrador óptico, que concentra mediante refracción, o más comúnmente mediante reflexión, la radiación solar en el receptor. Este último envía la energía térmica bien directamente a una máquina térmica para la producción de energía mecánica, o bien a un almacenamiento para su posterior uso en horas de mayor demanda eléctrica. Se distingue además un elemento llamado “fossil backup”, que consiste en una caldera o una cámara de combustión para generar energía térmica en momentos en los que el sol no da la energía suficiente para generar electricidad. Este elemento podría ser sustitutorio del almacenamiento, o estar ambos instalados para ser usado cuando el almacenamiento se quede sin carga; sin embargo, legislaciones como las que regulan las feed-in-tariff españolas prohíben el uso de combustibles fósiles en más de un pequeño porcentaje (15% en España, 25% en EEUU).

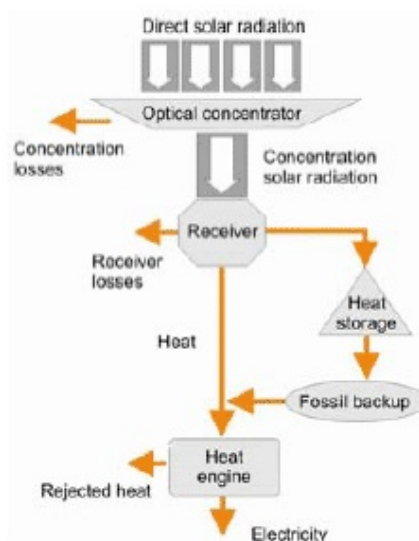


Figura 3. Diagrama de flujo genérico de una planta termosolar (Adaptado de Kreith *et al.* (2007)).

1.3 Límites en la concentración

En la figura 3 se observan 3 pérdidas de energía que implican bajadas de rendimiento: pérdidas en la concentración, pérdidas en el receptor, y pérdidas en el ciclo termodinámico. Las primeras no van a ser tenidas en consideración aquí, pues dependen principalmente de la reflectividad de los espejos, que no es un parámetro de diseño.

En cuanto a las pérdidas del receptor, dependen de la temperatura de este, pudiendo ser por convección y por radiación principalmente. Las primeras son dependientes de $T_{rec}-T_{amb}$, mientras que las segundas lo son de $T_{rec}^4-T_{amb}^4$. Así, suponiendo una concentración C (que tiene en cuenta el rendimiento de concentración), una intensidad de la radiación solar I , y una absorptividad del receptor α , el rendimiento del receptor será:

$$\eta_{rec}=\alpha\cdot(h\cdot(T_{rec}-T_{amb})+\sigma\varepsilon\cdot(T_{rec}^4-T_{amb}^4))/CI \quad (1)$$

Esto es, a mayores temperaturas del receptor, menor rendimiento. Del mismo modo se observa que si se quiere conseguir altas temperaturas con un rendimiento no muy bajo, es necesario aumentar la concentración.

Por otro lado, el rendimiento del ciclo termodinámico se puede asemejar de manera ideal al de un ciclo Carnot:

$$\eta_{Car}=1-T_{amb}/T_{rec} \quad (2)$$

Por consiguiente, mayores temperaturas acarrearán mayores rendimientos en el ciclo. De esto se deduce que hay que encontrar una temperatura de compromiso para maximizar el rendimiento global, la cual dependerá de la concentración alcanzada con el campo solar seleccionado.

Esta concentración está limitada por aspectos físicos y tecnológicos. Por un lado, la propia naturaleza del Sol, que consiste en un disco visto desde la tierra y no un punto, hace que haya una incertidumbre en la dirección de cada rayo, dentro de los límites de un cono de semiángulo $16'$. De esta manera, la reflexión de una parábola perfecta en un foco situado a 30 m se trata de una mancha de unos 30 cm de diámetro, y no de un punto perfecto. Esto limita la concentración teórica máxima a 215 soles para concentradores lineales (en 2D), y 46200 soles para concentradores puntuales (3D).

Sin embargo estos valores son altamente superiores a los alcanzables en la realidad, dado que ni la instalación de los espejos de receptores, ni el proceso de reflexión en los primeros, ni el mecanismo de enfoque, son perfectos, lo cual añade incertidumbre a la dirección del rayo reflejado.

2 Tecnologías

En la figura 3 se muestra el esquema de una planta termosolar, en la que se distingue el concentrador, el receptor, el almacenamiento térmico, la caldera o cámara de combustión de backup, y el ciclo térmico. Los dos primeros son tan intrínsecamente dependientes, que no tiene sentido estudiarlos de manera separada; por ello se habla de manera conjunta del campo solar.

2.1 *Campo solar*

2.1.1 Colectores cilindro-parabólicos

Se trata de la tecnología más extendida en España y en el mundo. Todas las plantas españolas de este tipo tienen un tamaño de 50 MW_e, que es máximo que permite la legislación vigente para venderse a tarifas de régimen especial, pudiendo ser su tamaño de hasta 300 MW_e cuando no está sujeta a limitaciones legislativas. Consisten en espejos cilindro-parabólicos que concentran la luz sobre el receptor, un tubo de pared selectiva (baja emisividad, alta absorptividad) en el interior de un tubo transparente con vacío entre ambos. Por el interior del receptor para un aceite que puede alcanzar temperaturas máximas de 400°C; este es un factor limitante, pues los CCP alcanzan concentraciones de 60-70 soles, suficiente como para alcanzar mayores temperaturas en el fluido térmico. Por ello hay numerosas investigaciones en el uso de otro fluido térmico, como sales fundidas, lazos de gas comprimido y generación directa de vapor. Es este último caso destaca la aportación de la Planta Solar de Almería, perteneciente al Ciemat, que ha publicado trabajos de calado internacional (Eck et al., 2006, Valenzuela et al., 2006).

La ventaja fundamental de esta tecnología en la actualidad es su madurez, ya que más de 350 MW_e fueron instalados a finales de los 80 en California, y han sido mantenidos en funcionamiento hasta la actualidad. Sin embargo, cuenta con numerosas limitaciones, entre las que destacan las soldaduras vidrio-metal en el receptor, susceptibles de ruptura bajo altas temperaturas, las juntas en los extremos de cada módulo, que deben de rotar con el seguimiento del sol, produciendo a menudo fugas tóxicas, la gran cantidad de acero necesaria para la estructura del colector, y la limitación de temperatura frente a tan alta concentración.

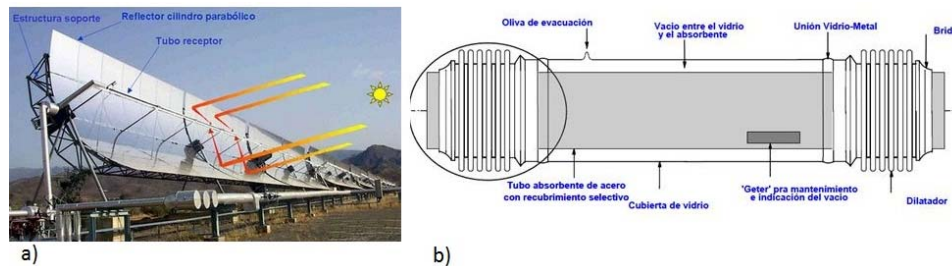


Figura 4. a) Foto de un colector CCP y b) esquema de su tubo receptor.

Las plantas instaladas en la actualidad consiguen rendimientos ópticos de 70-76%, rendimientos de recepción de entre 40 y 50%, y rendimientos globales del 16%, tras generar vapor en una caldera con el aceite sintético para posteriormente alimentar un ciclo Rankine, tal y como muestra la figura 5.

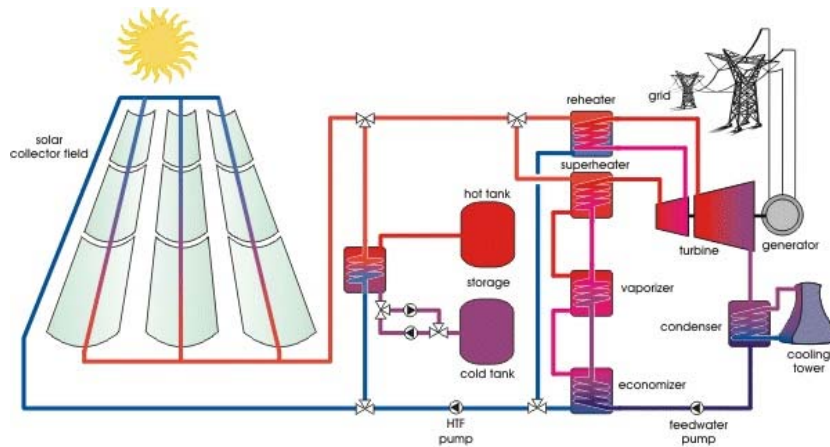


Figura 5. Esquema de una planta termo solar con colectores CCP.

2.1.2 Receptor central

Esta tecnología consiste en un receptor situado en lo alto de una torre al que enfocan numerosos espejos de tamaños superiores a los 100m² distribuidos a su alrededor, ver figura 6. Con esta configuración se alcanzan muy altas concentraciones, de entre 200 y 1000 soles, con lo cual se podrían buscar ciclos de alta temperatura.

Si bien los CCP tienen una configuración muy establecida, con la salvedad del posible uso de otro fluido caloportador, los campos solares de torre pueden ser muy diferentes entre sí. Esto se debe, entre otras cosas, a las ya mencionadas altas temperaturas alcanzables, y a la libertad de diseño que permite la separación espejos-receptor. De este modo, las plantas solares PS10 y PS20, primeras comerciales con tecnología de torre central, son de generación directa de vapor, que es enviado directamente al ciclo de potencia, mientras que la planta Gemasolar utiliza sales fundidas para captar el calor y almacenar, gestionando la generación de vapor en una caldera para alimentar la turbina. Además, hay numerosas investigaciones en el uso de receptores volumétricos con aire como fluido caloportador, bien a presión atmosférica para la posterior generación de vapor, bien a alta presión para alimentar un ciclo de gas o ciclo combinado.

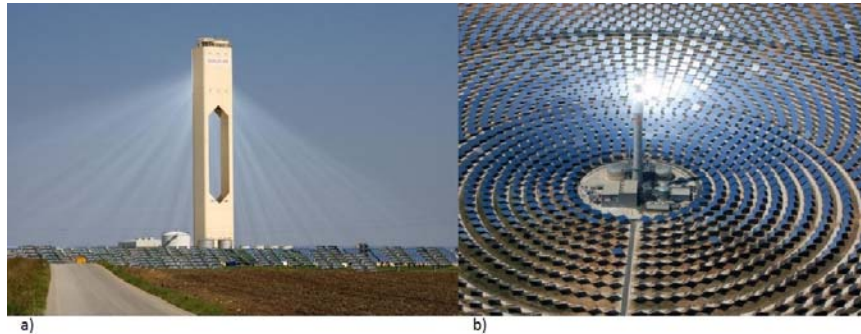


Figura 6. Plantas solares a) PS10, de Abengoa, y b) Gemasolar, de Torresol Energy.

Las ventajas de esta configuración más importantes son la posibilidad de alimentar ciclos termodinámicos de mayor rendimiento gracias a altas temperaturas, y la no necesidad de superficies extremadamente planas para su instalación. Sin embargo, debido a la dificultad de transmitir el calor a aire y la fragilidad de los receptores volumétricos, las plantas instaladas hasta ahora trabajan con ciclos de vapor a temperaturas no muy elevadas, y cabe plantearse la necesidad de concentrar tanto la luz si esto no se materializa en el ciclo de potencia. Además, el tamaño de cada planta está limitado por el hecho de apuntar todos los heliostatos al mismo receptor, salvo que se use tecnología multitorre.

2.1.3 Receptor lineal Fresnel

Se trata de una tecnología a la que no se le ha dado la debida importancia hasta ahora a pesar de su potencial para reducir costes. Es un colector lineal, al igual que los colectores cilindro-parabólicos, pero tiene un solo receptor fijo a cierta altura sobre los espejos, como una torre central (ver figura 7).



Figura 7. Fresdemo, situado en la Planta Solar de Almería.

Tiene las ventajas y desventajas de los campos solares lineales: por un lado se pueden situar varios módulos en paralelo, alimentando todos al

mismo ciclo de potencia, pero por el otro se necesitan de terrenos llanos para ser instalados. Sin embargo, a diferencia de los CCP, el receptor está fijo en lo alto de una estructura; por ello no son necesarias juntas rotativas en sus extremos, y al no haber vacío entre los tubos y la ventana, tampoco son necesarias las juntas metal-vidrio. Además, la estructura es mucho más ligera al ser los cristales menos anchos y no mover los receptores.

En contrapartida, las concentraciones alcanzadas son mucho inferiores, alrededor de los 30 soles, y además varía de manera importante a lo largo del día. En cualquier caso, esta concentración es suficientemente alta como para calentar el aceite sintético usado por los CCP a su máxima temperatura, 400°C. También se considera una tecnología interesante de cara a la generación directa de calor, puesto que la inexistencia de juntas rotativas hace más sencillo el paso de agua a gran presión. En la actualidad hay una planta en Calasparra de 1.4 MW, y se está construyendo otra en paralelo de 30 MW.

2.1.4 Colectores disco-parabólicos

Se trata de una tecnología modular, en la que un disco parabólico de diámetro típico entre 8 y 10 m refleja la luz sobre un receptor que alimenta a un motor Stirling. Consigue muy altas concentraciones, de hasta 3000 soles, con lo que el motor funciona a temperaturas superiores a los 600°C; ello hace que se consiguen rendimientos de pico “sol a electricidad” de hasta 30%, siendo el máximo jamás obtenido con cualquier tecnología CCP (se consiguió en los años 80).



Figura 8. Dos tecnologías distintas de discos parabólicos.

El problema de los discos parabólicos es que, al tratarse de una tecnología modular, teniendo cada módulo su propio motor, las posibilidades de reducción de coste son menores. Además, por el mismo motivo, es difícil aplicar almacenamiento térmico a esta tecnología.

La investigación se centra en reducción de costes de fabricación de parábolas, habiendo diferentes tipos (ver figura 8), y en aumentar la duración de los motores Stirling.

2.2 *Ciclo de potencia*

En principio las plantas termosolares pueden alimentar a cualquier ciclo de combustión externa:

- Ciclo Rankine, o turbina de vapor
- Ciclo Rankine Orgánico, ORC
- Turbina de gas de combustión externa
- Ciclo combinado de combustión externa
- Motor Stirling

La posibilidad de usar un ciclo u otro depende de la temperatura alcanzada por el fluido caloportador. Los ORC se usan para energía geotérmica desde hace varias décadas, con unas temperaturas típicas de 200°C. Sin embargo, por lo general los receptores solares alcanzan temperaturas más altas, no siendo rentable su uso. Esto hace que hasta la fecha todas las plantas solares comerciales instaladas utilicen ciclos Rankine convencionales, normalmente con recalentamiento. Estos ciclos son competitivos energéticamente a temperaturas de entre 300°C y 600°C, y cuentan con una enorme madurez gracias a su uso en plantas de carbón y nucleares entre otros.

Mediante el uso de turbinas de gas, y más concretamente instaladas en un ciclo combinado, podría aumentarse el rendimiento de manera importante. Sin embargo esto solo es aplicable a aire comprimido a muy altas temperaturas, alrededor de los 1000°C, difíciles de conseguir con el bajo coeficiente de película del aire.

Los motores Stirling cuentan con una madurez mucho menor, lo cual hace que tengan problemas de durabilidad. Su uso se limita a discos parabólicos, dados que se trata del único ciclo de combustión externa capaz de generar electricidad a microescala.

2.3 *Almacenamiento térmico*

Se trata de la gran baza de la electricidad termosolar. Gracias al él, una planta termosolar puede funcionar durante 24 horas a potencia nominal, como ya ha sido el caso de la planta Gemasolar (www.torresolenergy.com). Esto implica unos factores de carga potenciales del 70%, y una capacidad para generar más o menos electricidad a lo largo del día según sean las necesidades.

Ni las placas fotovoltaicas ni los parques eólicos, las otras dos tecnologías renovables de gran expansión en la última década, tienen esta capacidad de gestión y regulación; es más, si se conectase una capacidad suficiente de termosolar con almacenamiento a la red eléctrica, esta podría servir para apoyar a las otras renovables junto a la hidroelectricidad. Además, el uso de almacenamiento permite un mayor control del ciclo de potencia, evitando en cierto modo ciertos transitorios.

Gran parte de las instalaciones CCP en España tienen 7.5 horas de almacenamiento, lo cual aumenta la producción estimada de poco más de 100 GWh al año a 185 GWh. Torresol Energy ha decidido ir un paso más allá con la instalación de 15 horas a producción nominal de almacenamiento. Esto hace que su planta de 20 MW tenga una producción estimada de 100 GWh al año, mientras que la planta PS20 de Abengoa Solar, con la misma potencia

nominal pero con una sola hora de almacenamiento, tenga una producción estimada de 44 GWh.

Ciertas publicaciones indican que la instalación de almacenamiento es más rentable económicamente cuanto menor es el coste del campo solar (Montes et al., 2009). Esto tiene gran importancia de cara a la elección de la tecnología en el futuro, que tal vez deban de buscar más el bajo coste que el alto rendimiento, pudiendo aumentar así su gestionabilidad.

Igual que pasaba con los receptores de torre central, la gran libertad en el diseño de almacenamiento abre un gran abanico de posibilidades. Si el fluido caloportador del receptor es aceite sintético o sales fundidas, este mismo fluido podrá ser utilizado como almacenamiento. Sin embargo, el aceite sintético ha de mantenerse a altas presiones, lo cual supone un gran aumento del coste; esto ha llevado a almacenar la energía térmica en sales fundidas previo paso por un intercambiador de calor entre estas y el aceite.

Si el receptor es de generación directa de vapor, el almacenamiento se puede realizar en forma de vapor a alta presión, aunque debido a los grandes volúmenes que ocuparía, esta opción es solo válida para poco tiempo de funcionamiento (PS10 y PS20 utilizan esta tecnología para almacenar 1 hora a potencia nominal, con el objetivo principal de hacer frente a transitorios cortos). Alternativamente, se podría condensar el vapor a alta presión almacenando el valor latente en aceite o sales fundidas, minimizando así el tamaño del sistema.

Por último, si el fluido caloportador se trata de aire, a presión atmosférica o comprimido, el almacenamiento podrá realizarse en sólidos cerámicos u hormigón por convección.

2.4 Backup o hibridación

Como alternativa al almacenamiento térmico, cabe la posibilidad de instalar una caldera o cámara de combustible capaz de proporcionar la energía necesaria a partir de biomasa o gas natural cuando el sol no está disponible. En España la hibridación con gas natural u otros combustibles fósiles no es una posibilidad, puesto que hay limitaciones en su uso para conseguir primas de régimen especial; sin embargo hay varios proyectos de plantas con hibridación en el mundo, en las que se podría decir que el “backup” es la solar. Estas plantas reciben el nombre de “Integrated Solar Combined Cycle Systems”, ISCCS, y en ellas colectores cilindro-parabólicos dan un extra de potencia térmica para la generación de vapor en paralelo a la caldera de recuperación de calor de un ciclo combinado.

En España hay un proyecto con hibridación con biomasa en Lleida de 22.5 MW, con finalización planificada a finales de 2012.

3 Desarrollo de la electricidad termosolar

La primera era de gran desarrollo de la electricidad termosolar se dio en los 80, tras las crisis del petróleo del 73 y 79. Esto condujo a estudiar vías alternativas a la generación de electricidad, con la creación de prototipos en EEUU (Solar One y Solar two), España (creación de la Planta Solar de Almería, con la torre CESA-1) e Israel entre 1981 y 1985. Este proceso acabó

en la construcción de las primeras plantas comerciales, las SEGS, con tecnología cilindro-parabólica hibridada con combustibles fósiles. Estas plantas fueron instaladas entre el 84 y el 90, con una potencia total instalada de 354 MW que sigue generando electricidad en la actualidad.

Tras la instalación de estas plantas, el precio del combustible fósil volvió a disminuir, por lo que el interés en esta energía se fue diluyendo por su mayor coste relativo. Este parón en investigación e instalación ha perdurado hasta el inicio del nuevo milenio, cuando las preocupaciones por la emisión de gas de efecto invernadero y el cambio climático planetario han dado un nuevo impulso a las energías renovables en general, y a la termoeléctrica solar en particular. Este boom ha sido especialmente importante en España en la primera década, donde se han construido 852.4 MW frente a los 52 MW de EEUU (sin tener en cuenta los 354 MW construidos en los 80). La causa de esta explosión de inversiones en España está básicamente en los RD 436/2004 y RD 661/2007, que establecieron y consolidaron un régimen de primas muy atractivos para el sector. Los objetivos en el Plan de Energías Renovables totalizaban 500 MW para el año 2010, sobrepasados amplísimamente por la reacción del sector. Ello implica un gran sobre coste para el Estado español, por lo que el Real Decreto Ley 6/2009 impuso una serie de condiciones para la tramitación de los expedientes e incorporación al régimen de prima establecido. De esta manera, se establecieron unos límites de potencia acumulada de 1350 MW para 2011, y 1850 MW para 2012. El caso de EEUU es el contrario: ha tardado más en reincorporarse a la electricidad termosolar, pero la cantidad de plantas planificadas en la actualidad es dos órdenes de magnitud mayor que en España, debido en parte al complejo proceso de preasignación adoptado en España tras el susodicho Real Decreto.

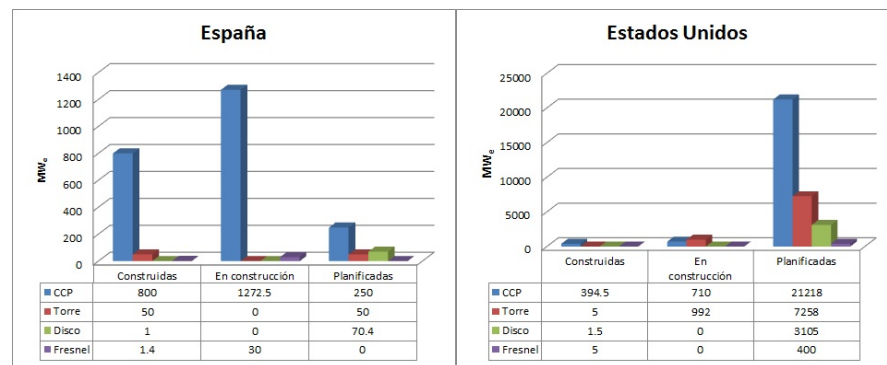


Figura 9. Potencias instaladas, en construcción y planificadas en España y Estados Unidos (datos de Protermo Solar y CSP today respectivamente).

Si analizamos la figura 9, se observa que la inmensa mayoría de potencia instalada en España y EEUU, los dos grandes mercados hasta el momento, son CCP. Más aún, se trata de replicaciones de las plantas SEGS de California, con muy pocas modificaciones. Esto se debe principalmente a la madurez que la experiencia operativa de dichas plantas ha dado a la

tecnología; lo cual, unido a las sustanciosas primas a la energía termosolar, de más de 27 céntimos de Euro por kWh en España durante los primeros 25 años, y 21 c€ a partir de entonces, ha provocado que los agentes financieros diesen una clara prioridad a esta opción de mínimo riesgo. De esta forma, la mayor parte de las instalaciones realizadas han supuesto más una reducción de costes de instalación y operación que un avance en la tecnología gracias a la investigación. No cabe duda de que esta explosión en España ha supuesto beneficios para las empresas españolas, que han tomado gran prestigio internacional, haciéndose con importantes contratos en países como EEUU; sin embargo, de cara al desarrollo de la tecnología, cabe preguntarse si se está avanzando por la curva de aprendizaje óptima, o si sería más conveniente moverse hacia otras configuraciones.

3.1 *El futuro del sector*

Las predicciones en el mundo de la energía siempre han sido imprecisas, más si cabe en estos tiempos de inestabilidad económica y geopolítica. Prueba de ello son estudios como el realizado por la Comisión Europea [2003], donde se supone un aumento lento y progresivo de los precios del petróleo, siempre inferiores a los 30€ por barril. En ese mismo informe, se predice una participación de las energías del 3% en el mix eléctrico mundial para el 2030 (excluyendo la energía hidráulica), teniendo las tecnologías solares una importancia inapreciable; sin embargo, ya en 2008 el 2.8% de la producción mundial de la electricidad provenía de energías renovables [IEA, 2010].

Otros informes técnicos y científicos (Aringhoff et al., 2002, DeMeo and Galdo, 1997, D.W., 2003, Enermodal Engineering, 1999, IEA, 2003, M. et al., 2002, Turkenburg, 2000) han predicho una implementación mundial de entre 2 y 8 GW de energía solar, muy cerca de la realidad. El World Fundación Energy Assessment, publicado en 2000 por las Naciones Unidas y el World Energy Council, predijo un crecimiento de la energía solar sostenido en el 20-25% tras 2010, y una media del 15% a partir de 2020, con lo que se llegaría a una generación global de 800-1200 GW de potencia termo-solar hacia 2050.

Para que esto se haga realidad, hubo dos conferencias ejecutivas internacionales, junio 2002 en Berlín y octubre 2003 en Palm Spring, a la que acudieron importantes ejecutivos de la energía, las finanzas y la legislación. En ellas se definió y puso en marcha el Global Market Initiative (GMI), un mercado global coordinado de energía termo-solar con la intención de crear 5000 MW de plantas de gran escala a corto plazo.

Todo esto pone en evidencia el interés global que hay en esta tecnología, debido sobre todo a su potencial para reducir costes a media escala, y a su capacidad de regulación y flexibilidad.

3.2 *Hacia dónde moverse*

Evidentemente, la respuesta a “¿cuál es la tecnología que minimizará los costes?” no tiene una respuesta inmediata, a pesar de que hay numerosas predicciones de costes para cada una. Mirando a la figura 9 se ve que la

instalación de CCP es generalizada, y no localizada en España. También es interesante que los reflectores lineares Fresnel son los que menos proyectos planificados tienen entre las cuatro tecnologías. Esto va en contra de los datos observados por Muñoz et al., 2010, que concluyen que el uso de estructuras más baratas como las Fresnel pueden llevar a rendimientos muy parecidos a los de CCP –ver figura 10–.

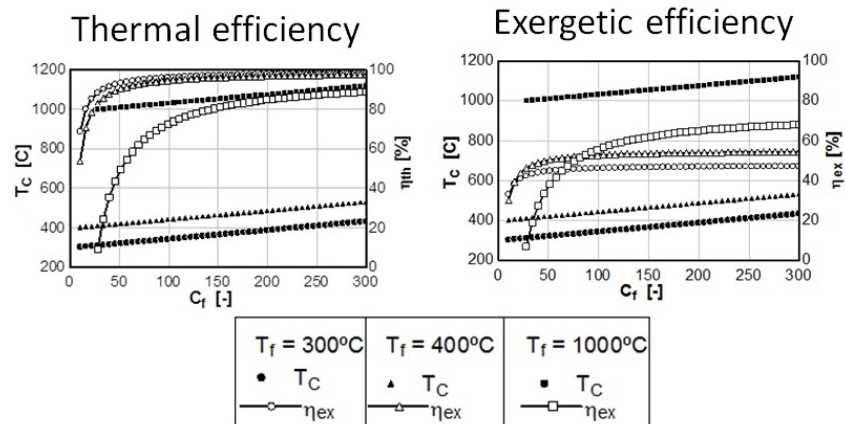


Figura 10. Rendimientos térmico y exergético de un colector lineal dependiendo de la temperatura media del fluido y la concentración solar.

En esta figura se observa que, según se aumenta la concentración para una misma temperatura media de fluido, hay un aumento de rendimiento (ver ecuación 1). Sin embargo, llegada una concentración dada, hay un efecto de saturación, y el aumento de concentración no implica un aumento de rendimiento apreciable. Para fluidos de temperaturas de 300°C o 400°C , este efecto se da a concentraciones cercanas a los 30 soles, por lo que cabe cierta duda en el uso de concentraciones de 60-70 soles como es el caso de los CCP cuando ello implica un mayor coste.

En cuanto a la promoción de discos Stirling, tienen la ventaja y desventaja de ser modulares: por un lado, podrían ser instalados para la microgeneración, como las placas fotovoltaicas, cosa que no es viable con el resto de tecnologías. Sin embargo, al igual que las PV, no contarían con almacenamiento térmico, y a día de hoy se ve con incertidumbres su capacidad de competir en precio con ellas.

Finalmente, en lo que respecta a las torres centrales, se ven como un gran candidato a hacerse con el dominio de la tecnología por las posibilidades de alcanzar altas temperaturas que mejoren su rendimiento. El problema fundamental es que, al enfocar todos los espejos a un mismo receptor, el tamaño de la planta está limitado, por lo que también lo están las posibilidades de instalar un ciclo combinado para hacer viable este aumento de rendimiento.

4 Conclusiones

Esto deja patente que las posibilidades son numerosas en la actualidad, y que no hay una tecnología vencedora en la carrera por el mercado del CSP todavía, como lo fue el aerogenerador tripala frente a otras posibilidades en su momento. Por ello es de vital importancia realizar un gran esfuerzo en investigación, abriendo el arco de posibilidades, en lugar de seguir invirtiendo en tecnologías ya maduras a base de un enorme coste económico para nuestras tecnologías.

Referencias

J. Duffie, W. Beckman, Solar engineering of thermal processes, John Wiley And Sons, second edn., ISBN 0-471-51056-4, 1991.

M. Eck, E. Zarza, Saturated steam process with direct steam generating parabolic troughs, Solar Energy, Volume 80, Issue 11, European Solar Conference (EuroSun 2004), EuroSun Conference 2004, November 2006, Pages 1424-1433, ISSN 0038-092X.

F. Kreith, D. Goswami, Handbook of energy efficiency and renewable energy, Mechanical engineering series, CRC Press, ISBN 9780849317309, 2007.

Montes, M.J., Abánades, A., Martínez-Val, J.M., Valdés, M., 2009. Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors. Solar Energy 83 (12), 2165–2176.

J. Muñoz, J. M. Martínez-Val, A. Ramos, Thermal regimes in solar-thermal linear collectors, Solar Energy 85 (5) (2011) 857 – 870, ISSN 0038-092X.

V. Quaschnig, Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation, Solar energy 77 (2) (2004) 171–178.

T. Stoffel, D. Renné, D. Myers, S. Wilcox, M. Sengupta, R. George, C. Turchi, CONCENTRATING SOLAR POWER: Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar, Technical Report NREL/TP-550-47465 September 2010.

L. Valenzuela, E. Zarza, M. Berenguel, E.F. Camacho, Control scheme for direct steam generation in parabolic troughs under recirculation operation mode, Solar Energy, Volume 80, Issue 1, January 2006, Pages 1-17, ISSN 0038-092X.

Sitios web de interés

<http://www.csptoday.com>

<http://www.energiasrenovables.ciemat.es>

<http://www.estelasolar.eu>

<http://www.protermosolar.com>

<http://www.solarpaces.org>

<http://www.torresolenergy.com>

Integración Energética

José Antonio Souto González

Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Compostela

1 Introducción

La integración energética pretende alcanzar el grado óptimo de aprovechamiento de todos los flujos energéticos de una planta industrial o instalación análoga (máxima recuperación energética, MER), teniendo en cuenta al mismo tiempo otros factores que limitan dicha recuperación. Las metodologías de integración energética de mayor éxito aplican técnicas de optimización de procesos siguiendo el análisis energético de los mismos, y de las restricciones del proceso derivadas de dicha integración: Diseño Termodinámico de Procesos.

El Diseño Termodinámico de Procesos debe cumplir las siguientes reglas básicas:

1. El punto focal del análisis será la energía, si bien deben de tenerse en cuenta otros aspectos como: El coste de los equipos, la potencia o trabajo consumido, la conversión de calor en trabajo, el consumo de utilidades (calefacción y refrigeración externas), de agua o de agentes extractores, la generación de emisiones de contaminantes y las restricciones inherentes a la capacidad energética del proceso.
2. Además de los aspectos energéticos, la integración de procesos debe considerar también cuestiones como el flujo del proceso y el funcionamiento de sus unidades, que debe quedar garantizado aún cuando se planteen modificaciones en el mismo derivadas de la integración energética.
3. La integración energética no debe restringirse a un proceso o una unidad individual, sino que debe abarcar preferentemente toda la planta industrial.

4. Las tecnologías de integración de procesos son aplicables tanto a procesos continuos como batch.

5. La integración energética debe ser flexible, de manera que permita la obtención de múltiples soluciones (más o menos próximas a la MER), que permitan elegir aquella que mejor se adecue a otras restricciones del proceso como: Seguridad de las instalaciones, control y operación de la planta.

2 Diseño termodinámico de procesos

El diseño termodinámico de procesos se subdivide habitualmente en dos etapas de análisis energético, en función de las unidades energéticas consideradas en cada una de ellas:

1. Integración de calor: Se realiza mediante la síntesis de redes de intercambiadores de calor (HENS), que permite la integración energética de la planta industrial, con unidades que permiten transferir calor desde una corriente de proceso a otra: Intercambiadores de calor.

2. Integración de calor y potencia: También denominada Integración Energética Total, en este caso, y a partir de las corrientes energéticas derivadas de la integración de calor y de las condiciones termodinámicas del proceso, se plantea la integración óptima de máquinas térmicas, de manera que se alcance el máximo aprovechamiento energético en el proceso.

A partir del estudio de las reglas básicas de la tecnología pinch a aplicar en la integración de calor es posible derivar la metodología más adecuada para la integración energética óptima de máquinas térmicas en los procesos industriales. Por esa razón, y a partir de la introducción de dichas reglas, se derivará y aplicará el método de integración óptima de calor y potencia.

2.1 Integración de calor

El problema de la síntesis de redes de intercambiadores de calor (HENS) puede definirse como la determinación de la red de intercambios más eficaz en términos de costes, capaz de transferir calor entre un conjunto de corrientes de proceso, donde cualquier calentamiento o enfriamiento que no pueda ser satisfecho por intercambios entre estas corrientes deberá ser proporcionado por utilidades externas (vapor, aceite caliente, agua de refrigeración y fluidos refrigerantes).

Otras restricciones, como la topología de la planta, la seguridad, flexibilidad, operatividad y controlabilidad del proceso, también deben tenerse en cuenta, de manera que la red diseñada resulte viable.

Las etapas a seguir en la integración de calor de una planta industrial son las siguientes:

1. Análisis energético del proceso: Identificación de los parámetros energéticos necesarios para la integración de calor.

2. ΔT_{min} : El intercambio de calor entre dos corrientes de proceso solo se producirá si la corriente que cede calor (caliente) posee una temperatura mayor que aquella que lo recibe (fría). En la práctica, es necesario que exista una diferencia mínima de temperaturas (ΔT_{min}) de valor finito entre las dos

corrientes que intercambien calor ya que, de otro modo, el área de intercambio de calor resultaría excesivamente grande:

$$Q = hA\Delta T$$

siendo h el coeficiente de transmisión de calor, ΔT la diferencia de temperaturas entre las dos corrientes de proceso, y A el área de intercambio, que condiciona el coste de los intercambiadores a instalar.

El área de intercambio es el principal parámetro en la evaluación del coste de los intercambiadores a instalar, por lo que el valor de ΔT_{\min} elegido condicionará dicho coste: Si aumentamos ΔT_{\min} , disminuirá A y el coste asociado, y viceversa. Por esa razón, es necesario elegir un ΔT_{\min} para el análisis energético del proceso que, posteriormente, puede flexibilizarse en función del área de intercambio finalmente obtenida.

Los valores habituales de ΔT_{\min} aplicados en instalaciones industriales oscilan entre 10 y 20 °C, dependiendo del grado de recuperación energética que se desee alcanzar.

3. **Máxima recuperación de energía (MER):** La primera restricción para alcanzar la máxima integración de calor en un proceso viene derivada de las disponibilidades y necesidades energéticas de las corrientes. En esta etapa, se realiza la determinación de la máxima cantidad de calor transferible entre corrientes de proceso, las utilidades mínimas requeridas y restricciones para alcanzar este objetivo.

Es importante observar que, a mayor ΔT_{\min} , menor será el calor recuperado, ya que se restringen las corrientes que pueden intercambiar calor.

4. **Pinch:** La segunda restricción en la recuperación de energía viene derivada de las temperaturas de las mismas, ya que una corriente no puede ceder calor a otra que se encuentre a una temperatura mayor o igual. Elegido un valor para ΔT_{\min} , se define el pinch como el intervalo de temperaturas (dentro de las que abarcan las corrientes de proceso) en el cual la diferencia de temperaturas entre las corrientes de proceso es al menos igual a ΔT_{\min} .

Para la resolución de las etapas 3 y 4 existe el Algoritmo de la Tabla Problema (PTA), que permite definir la MER y el intervalo pinch para un valor elegido de ΔT_{\min} .

5. **Evaluación del área global de intercambio:** Antes de la definición de los intercambios entre corrientes de proceso, es posible estimar el valor del área total suma de todos los intercambios, que nos permitirá calcular el coste asociado a los equipos de intercambio a instalar. De esta forma, y en función de dicho coste y de la MER prevista, es posible revisar el valor de ΔT_{\min} , si se desea, a fin de ajustar la solución al óptimo económico.

6. **Síntesis de la red de intercambios:** Una vez definido el objetivo MER y la restricción pinch, mediante la aplicación de una serie de reglas se definen los intercambios entre corrientes de proceso, de tal manera que se verifiquen todas las condiciones anteriores. Aunque existen diferentes métodos para dicha síntesis, el de mayor éxito es el derivado directamente del análisis termodinámico según la Metodología Pinch.

7. **Relajación de la MER:** Una vez alcanzada la red de intercambios MER, es posible relajar dicha condición, eliminando intercambios poco prácticos y modificando otros, de manera que nos permitan alcanzar la red

más eficiente no solo desde el punto de vista energético, sino también teniendo en cuenta el resto de los factores asociados al proceso productivo.

En esta metodología, las etapas 5 y 7 se aplican de manera opcional, especialmente en procesos de reducida complejidad en los cuales una reevaluación del ΔT_{min} no suele suponer un gran ahorro (etapa 5) y el número de intercambios necesarios no genera una red excesivamente compleja que pueda condicionar el funcionamiento del proceso (etapa 7). Por eso, suele ser suficiente con completar el diseño con una evaluación del coste a partir del área de intercambio, antes de proceder al diseño de los intercambiadores.

A continuación se analizarán con más detalle los métodos asociados a cada una de estas etapas.

2.1.1 Etapa 1: Análisis energético del proceso

Para la realización de la síntesis de una red de intercambiadores de calor, del análisis del diagrama del proceso debe derivarse la siguiente información:

1. Conjunto de corrientes calientes (que disminuyen su temperatura) y corrientes frías (que aumentan su temperatura).
2. Temperaturas de entrada y de salida de todas las corrientes indicadas.
3. Caudales de todas las corrientes indicadas.
4. Calores específicos y coeficientes de transmisión de calor de las corrientes indicadas. Si no se conoce su dependencia con la temperatura, puede ser suficiente con un valor medio para cada corriente.
5. Caídas de presión aceptables y exigidas, para todas las corrientes indicadas.
6. Utilidades disponibles: Temperaturas, calores específicos, coeficientes de transmisión de calor y costes.
7. Coste del área de intercambio de calor.

De esta información, para su aplicación a la síntesis de la red de intercambio es suficiente con disponer de la correspondiente a los 4 primeros puntos.

2.1.2 Etapa 2: ΔT_{min}

La diferencia mínima de temperaturas admitida en los intercambios de calor entre corrientes de proceso condiciona dos parámetros que guardan relación directa con la economía energética del proceso:

- a) El área de intercambio y, en consecuencia, el tamaño y número de intercambiadores. Como se ha indicado, a menor ΔT_{min} , mayor área de intercambio necesaria, lo que incrementa los costes de instalación y mantenimiento de los equipos.
- b) El calor recuperado, ya que un aumento del ΔT_{min} limita las posibilidades de intercambio de calor entre corrientes de proceso, a las que se exigen unas temperaturas de entrada y salida especificadas. En consecuencia, a menor ΔT_{min} mayores posibilidades de recuperación de calor, y mayor ahorro de energía, es decir, menores costes de explotación.

Tabla 1. Corrientes de proceso 4S1.

Corriente	Tent (°C)	Tsal (°C)	MCp (kW/°C)
H1	175	45	10
H2	125	65	40
C3	20	155	20
C4	40	112	15

El procedimiento de cálculo se explica a continuación, incluyendo los resultados parciales para el proceso 4S1, con $\Delta T_{\min} = 20^\circ\text{C}$.

2.1.3.1 Determinación del cambio de entalpía de cada corriente

Multiplicando la capacidad calorífica (MCp) por la variación de temperatura de cada corriente. Esto nos proporcionará una estimación de la cantidad de energía implicada en la integración.

Tabla 2. 4S1: Cálculo de Q_h y Q_c .

Corriente	Tent (°C)	Tsal (°C)	MCp (kW/°C)	Entalpía (Q, kW)
H1	175	45	10	1300
H2	125	65	40	2400
C3	20	155	20	2700
C4	40	112	15	1080

2.1.3.2 Utilidades máximas

Sumando por separado los cambios de entalpía de las corrientes calientes y frías se obtendrán los valores de las utilidades máximas de enfriamiento y calentamiento, respectivamente. Se obtendrá así el peor escenario, con el proceso sin integración energética alguna.

Tabla 3. 4S1: Cálculo de las utilidades máximas requeridas.

Utilidades máximas	Suma de entalpías	Flujo de calor (kW)
Calentamiento	Corriente frías = ΣQ_c	$2700 + 1800 = 3780$
Enfriamiento	Corriente calientes = ΣQ_h	$1300 + 2400 = 3700$

2.1.3.3 Utilidades mínimas según el Primer Principio

Teniendo en cuenta únicamente la conservación de la energía, la diferencia entre las utilidades de calentamiento (Q_{hu}) y enfriamiento (Q_{cu}) será:

$$(Q_{hu} - Q_{cu}) = \sum Q_c - \sum Q_h$$

siendo Q_c la variación de entalpía de cada corriente fría y Q_h la variación de entalpía de cada corriente caliente.

Sin embargo, las utilidades mínimas absolutas estarán condicionadas también por la capacidad de intercambio entre corrientes en función de sus temperaturas.

Tabla 4. 4S1: Cálculo de diferencia entre utilidades (inc. mínimas).

Utilidades máximas	Suma de entalpías	Flujo de calor (kW)
Calentamiento	Corriente frías = $\sum Q_c$	2700 + 1800 = 3780
Enfriamiento	Corriente calientes = $\sum Q_h$	1300 + 2400 = 3700
Diferencia de utilidades	($Q_{hu} - Q_{cu}$)	-80

2.1.3.4 PTA: Temperaturas.

Se escriben las temperaturas de las corrientes calientes y frías (tanto de entrada como de salida) en una sola columna, en orden decreciente, indicando cuales corresponden a las frías y cuales a las calientes.

2.1.3.5 PTA: Intervalos de temperaturas (T_{int}).

- Se resta $\Delta T_{min}/2$ a las temperaturas de las corrientes calientes.
- Se suma $\Delta T_{min}/2$ a las temperaturas de las corrientes frías.

Se sitúan todos los resultados, en orden decreciente, en una nueva columna. Si se obtuviesen dos temperaturas iguales, se incluye una sola de ellas.

Interval i	Col. A T_{int}			
0				165
1				122
2				115
3				55
4				50
5				35
6				30
Corr. MC_p	H1 10	H2 40	C3 20	C4 15

Tabla 5. 4S1: PTA: Intervalos de temperatura.

2.1.3.6 PTA: Capacidades caloríficas netas (MCpint).

Se trata de determinar la capacidad calorífica neta en cada intervalo de temperaturas, teniendo en cuenta las aportaciones de todas las corrientes presentes en ese intervalo.

La suma de las capacidades caloríficas de las corrientes calientes (MCpint,h) presentes en cada intervalo se resta de la suma de las capacidades caloríficas de las corrientes frías (MCpint,c) presentes en cada intervalo.

$$MC_{p\ int} = \sum MC_{pc} - \sum MC_{ph} , \text{ para cada intervalo.}$$

Interval <i>i</i>					Col. A <i>T_{int}</i>	Col. B <i>MC_{p,int}</i>
0					165	0
1					122	10
2					115	25
3					55	-15
4					50	25
5					35	10
6					30	20
Corr. MC_p	H1	H2	C3	C4		
	10	40	20	15		

Tabla 6. 4S1: PTA: Capacidades caloríficas netas de cada intervalo.

2.1.3.7 PTA: Entalpías netas (Qint).

Se determina la entalpía neta en cada intervalo de temperaturas, multiplicando la capacidad calorífica neta por la variación de temperaturas en el intervalo:

$$Q_{int} = MC_{pint} \cdot \Delta T_{int}$$

Interval <i>i</i>				Col. A T_{int}	Col. B $MC_{p,int}$	Col. C Q_{int}
0				165	0	0
1				122	10	430
2				115	25	175
3				55	-15	-900
4				50	25	125
5				35	10	150
6				30	20	100
Corr.	H1	H2	C3	C4		
MC_p	10	40	20	15		

Tabla 7. 4S1: PTA: Entalpías netas por intervalo.

2.1.3.8 PTA: Cascada energética (Q_{cas}).

Se determina el calor transferible desde los intervalos más calientes a los más fríos, intervalo a intervalo. Para ello, la entalpía neta de un intervalo (Q_{int}) es sustraída del resultado de la cascada energética (Q_{cas}) del intervalo inmediatamente superior:

$$Q_{cas,i} = Q_{cas,i-1} - Q_{int,i}, \text{ siendo } i \text{ el intervalo.}$$

Este cálculo se inicia en el intervalo superior ($i=0$), asignando $Q_{cas,0} = 0$.

Interval <i>i</i>					Col. A T_{int}	Col. B $MC_{p,int}$	Col. C Q_{int}	Col. D Q_{cas}
0					165	0	0	0
1					122	10	430	-430
2					115	25	175	-605
3					55	-15	-900	295
4					50	25	125	170
5					35	10	150	20
6					30	20	100	-80
Corr.	H1	H2	C3	C4				
MC_p	10	40	20	15				

Tabla 8. 4S1: PTA: Cascada energética.

2.1.3.9 PTA: Revisión de la cascada energética (R_{cas}).

Los valores de Q_{cas} obtenidos representan el déficit (-) o superavit (+) de energía en cada intervalo de temperaturas, considerando las máximas

posibilidades de transferencia de calor desde los intervalos superiores. Obviamente, no es sostenible un proceso en el cual exista déficit de energía por lo que, en el caso de que algún intervalo de temperaturas presente un déficit, será necesario compensarlo con utilidades de calentamiento.

Esta compensación del déficit dará lugar a una revisión de la cascada energética, ya que estamos introduciendo más energía que la que aportan las corrientes de proceso. Para esta revisión, se aplican los siguientes pasos:

- Se busca el intervalo con mayor déficit: Este déficit será la energía a aportar al proceso como utilidades de calentamiento.
- Se introduce esta energía de calentamiento sumándolo por encima del primer intervalo que presente algún déficit de energía.
- A continuación, será necesario recalcular la cascada de energía, ya que los Q_{int} se modificarán al introducir el calentamiento externo.

Como resultado, se obtiene una nueva cascada de energía, de la cual ya se pueden deducir los parámetros termodinámicos que definen la máxima recuperación energética (MER).

Interval i	Col. A T_{int}	Col. B $MC_{p,int}$	Col. C Q_{int}	Col. D Q_{cas}	Col. E R_{cas}
0	165	0	0	0	605
1	122	10	430	-430	175
2	115	25	175	-605	0
3	55	-15	-900	295	900
4	50	25	125	170	775
5	35	10	150	20	625
6	30	20	100	-80	525
Corr. MC_p	H1 10	H2 40	C3 20	C4 15	

Tabla 9. 4S1: PTA: Cascada energética revisada.

2.1.3.10 PTA: Pinch.

El intervalo de temperaturas para el cual se alcanza un valor de $R_{cas} = 0$ en la cascada energética revisada corresponderá al intervalo pinch. Téngase en cuenta que, aunque en la Tabla Problema aparezca una temperatura por intervalo, sumando y restando ΔT_{min} se obtendrán dos temperaturas derivadas de ésta, que definen un intervalo.

En el caso de R_{cas} tomase el valor 0 en un extremo de la cascada, o que ningún intervalo tuviese un valor 0, estaríamos ante un proceso en el cual el pinch se encuentra fuera del rango de temperaturas del proceso. Es lo que se denomina un *problema umbral*, que implica una menor limitación en el establecimiento de intercambios entre corrientes de proceso, como se verá.

En el problema 4S1, con $\Delta T_{min} = 20$ °C, el pinch se encuentra en el intervalo 115 °C \pm 10 °C.

2.1.3.11 PTA: Utilidades mínimas.

Las utilidades mínimas de calentamiento corresponderán al calor externo que ha sido necesario aportar para compensar el déficit de energía en el intervalo pinch.

Las utilidades mínimas de enfriamiento corresponden al calor residual que queda en el intervalo de temperaturas inferior, una vez completada la revisión de la cascada energética.

Por supuesto, la diferencia entre ambas utilidades tiene que ser la misma que la calculada en el punto 3, a partir del balance global de energía.

En el problema 4S1, del intervalo 0 se leen las utilidades mínimas de calentamiento: 605 kW; y del intervalo 6 se leen las utilidades mínimas de enfriamiento: 525 kW.

2.1.4 Etapas 5. Área total de intercambio

Conocidos los coeficientes de transmisión de calor aplicables a las corrientes de proceso, h , es posible determinar el área de intercambio para cada intervalo mediante la expresión:

$$A = \sum_i \left(\frac{1}{F \cdot LMTD} \right)_i \sum_j \left(\frac{Q_j}{h_j} \right)_i$$

siendo:

i = Intervalo de temperaturas.

j = Corrientes en el intervalo.

$LMTD$ = Diferencia de temperaturas media logarítmica para el intervalo i .

F = Factor de corrección, si el intercambio no se realiza en contracorriente.

Q_j = Variación de entalpía de la corriente j en el intervalo i .

h_j = Coeficiente de transmisión de calor de la corriente j .

En el caso de que se desee modificar dicha área de intercambio, sería necesario definir un nuevo ΔT_{min} y recalcular la cascada energética. Este cálculo es opcional, como se ha indicado.

2.1.5 Etapas 6. Síntesis de la red de intercambios: Metodología Pinch.

Es interesante observar que si incrementamos una de las utilidades mínimas (por ejemplo, de calentamiento) automáticamente necesitaremos incrementar la otra utilidad (enfriamiento) en la misma magnitud, para que siga verificándose el balance de energía. Además, como consecuencia de este aumento, la entalpía neta del intervalo pinch ya no será cero, sino que adoptará precisamente el valor de ese incremento.

Esto significa que, en ese caso, se producirá un intercambio de calor entre una corriente cuya temperatura está por encima del pinch y otra cuya temperatura está por debajo del pinch. Pero esto resulta energéticamente poco

eficiente, ya que implica aumentar el gasto de utilidades (enfriamiento y calentamiento).

Dado que no es posible intercambio calor a través del pinch, habremos dividido nuestro problema en dos, lo que generalmente simplificará su resolución.

Dándole la vuelta al razonamiento, es posible formular una serie de reglas basadas en el pinch, tales que buscan la máxima recuperación energética (MER). Estas reglas prácticas son las que permiten diseñar una red de intercambios que verifique la condición MER, de manera que si nos saltamos cualquiera de ellas, no podremos alcanzar dicha condición.

Este conjunto de reglas constituye la Metodología Pinch para la síntesis de redes de intercambiadores de calor, como se enumeran a continuación:

A) Reglas sobre los intercambios:

1. Impedir intercambios de calor a través del pinch, como ya se ha expuesto.
2. No ubicar utilidades de enfriamiento por encima del pinch.
3. No ubicar utilidades de calentamiento por debajo del pinch.

B) Reglas sobre el número de corrientes:

1. Por encima del pinch, el número de corrientes calientes con una de sus temperaturas en el pinch será siempre menor o igual que el número de corrientes frías con una de sus temperaturas en el pinch.
2. Por debajo del pinch, el número de corrientes frías con una de sus temperaturas en el pinch será siempre menor o igual que el número de corrientes calientes con una de sus temperaturas en el pinch.

Esta condición se deriva de la imposibilidad de ubicar utilidades de enfriamiento por encima del pinch o de calentamiento por debajo del pinch.

En el caso de que con las corrientes originales del proceso no se verifique alguna de estas condiciones, será necesario bifurcar una o varias corrientes de proceso, de modo que se verifiquen ambas condiciones:

- Bifurcaremos corrientes frías por encima del pinch.
- Bifurcaremos corrientes calientes por debajo del pinch.

C) Regla sobre las capacidades caloríficas (MCp):

Esta regla es aplicable en intercambios en contracorriente, como los menos restrictivos en la diferencia de temperaturas entre corrientes:

1. Por encima del pinch, para que dos corrientes caliente y fría (ambas con temperaturas pinch) intercambien calor será necesario que la capacidad calorífica de la corriente caliente sea menor o igual que la de la corriente fría.
2. Por debajo del pinch, para que dos corrientes caliente y fría (ambas con temperaturas pinch) intercambien calor será necesario que la capacidad calorífica de la corriente caliente sea mayor o igual que la de la corriente fría.

Esta condición se deriva de la necesidad de garantizar que a lo largo del intercambio la diferencia de temperaturas entre ambas corrientes sea siempre mayor o igual que ΔT_{\min} (ya que será ΔT_{\min} en el pinch).

Nuevamente, en el caso de que sea posible verificar esta condición y todavía no se haya alcanzado la MER, es posible facilitar los intercambios en el pinch bifurcando corrientes. De esta forma, al bifurcar una corriente estamos generando dos o más corrientes de menor caudal y, en consecuencia, de menor capacidad calorífica. Cuando esta condición no se cumpla, lo razonable será, por tanto:

- Bifurcar corrientes calientes por encima del pinch.
- Bifurcar corrientes frías por debajo del pinch.

D) Heurística Tick-off:

Esta regla no tiene un fundamento en el pinch, sino que se trata de una recomendación de carácter práctico que, generalmente, dará lugar a los resultados deseados.

Cuando se plantea un intercambio de energía entre dos corrientes de proceso, pueden ocurrir tres situaciones distintas:

- a) Que las dos corrientes alcancen sus temperaturas finales en el intercambio, dado que el contenido energético de la corriente caliente es igual a la demanda energética de la corriente fría. Este es el caso ideal ya que pasamos de 2 corrientes a 0. Sin embargo, pocas veces podremos encontrar.
- b) Que una de las dos corrientes alcance su temperatura final en el intercambio, en tanto que la otra corriente deja un tramo de temperaturas residual, como se incorporará como una corriente nueva al proceso de síntesis. En este caso, pasamos de tener 2 corrientes a solo una.
- c) Que ninguna de las corrientes alcance su temperatura final en el intercambio, con lo que cada una de ellas dejará una corriente residual. Es decir, seguimos teniendo dos corrientes, aunque su intervalo de temperaturas sea más corto.

La situación c) debe ser evitada ya que habitualmente generará una red con multitud de pequeños intercambios. Por eso, la *heurística tick-off* establece que al plantear un intercambio se debe intercambiar la cantidad de calor suficiente para que al menos una de las dos corrientes sea eliminada del proceso de síntesis, al alcanzar su temperatura final.

Como toda regla heurística, tiene sus excepciones, que es necesario evaluar en cada concreto. De forma general, sin embargo, suele ofrecer buenos resultados.

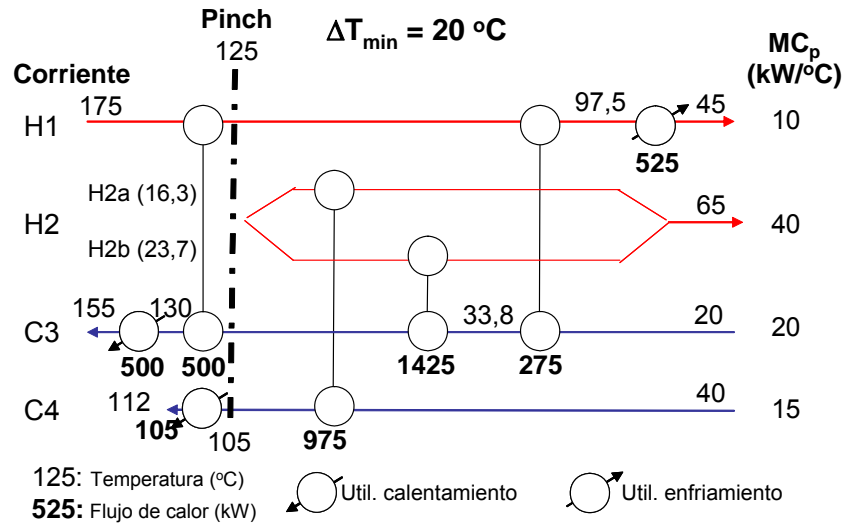


Figura 2. 4S1: Red de máxima recuperación energética (MER) para $\Delta T_{\min} = 20\text{ °C}$.

En el caso del proceso 4S1, este, sin embargo, no tiene porque ser el mejor resultado. En el proceso de cálculo hemos partido de un valor de $\Delta T_{\min} = 20\text{ °C}$ que no necesariamente corresponde a un óptimo económico, teniendo en cuenta el área de intercambio necesaria y la energía recuperada. Por eso, habitualmente las etapas 1 a 5 deberían ser reevaluadas hasta alcanzar un valor mínimo para el coste estimado del proceso.

2.2 Integración energética total

La integración óptima de sistemas de calor y potencia o trabajo requiere la combinación apropiada de los sistemas de consumo de energía, de producción de energía y de recuperación de calor, con el fin de minimizar los costes del proceso y maximizar su eficiencia energética.

Una vez alcanzado el óptimo en la recuperación de calor del proceso, la integración de las máquinas térmicas capaces de transformar el calor en trabajo y viceversa abre una serie de interrogantes que se pueden concretar en tres:

1. *Integración de máquinas térmicas:* ¿Cuál es la ubicación óptima de las máquinas térmicas y bombas de calor en nuestro proceso, desde el punto de vista termodinámico?
2. *Calidad de la energía:* ¿Cuál es el diseño óptimo del proceso desde el punto de vista de la *calidad* de la energía, y no solo de su cantidad?
3. *Integración energética total:* ¿Qué otros aspectos distintos de los termodinámicos es necesario considerar para alcanzar una integración óptima total?

Para responder a las dos primeras cuestiones existen reglas y métodos explícitos que permiten una evaluación objetiva del problema, y la obtención de un resultado para cada proceso que se aproxime al óptimo. La tercera cuestión no puede ser respondida sin un análisis global del proceso que excede el ámbito energético, si bien se pueden identificar los tipos de factores que es necesario considerar.

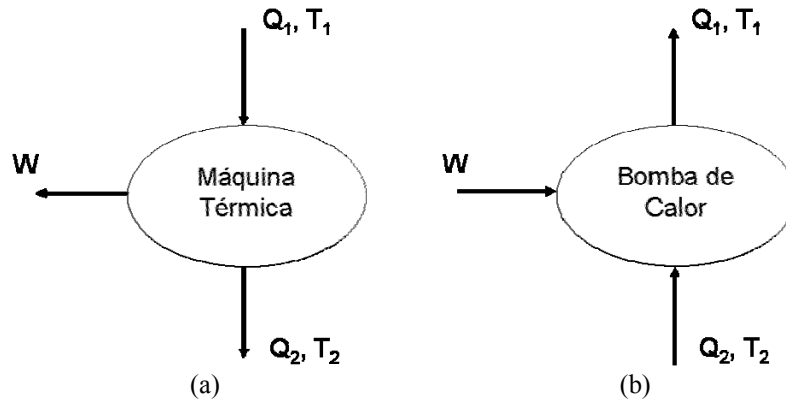


Figura 3. Esquema de máquinas termodinámicas:
(a) Máquina térmica; (b) Bomba de calor.

2.2.1 Integración de máquinas térmicas y bombas de calor

2.2.1.1 Máquinas termodinámicas

Desde el punto de vista termodinámico, podemos distinguir entre máquina térmica y bomba de calor como sigue:

1. Máquina térmica (figura 3a): Dispositivo que recibe un calor Q_1 de una fuente de energía a temperatura T_1 , cede un calor Q_2 a un sumidero de energía a la temperatura $T_2 < T_1$, y realiza un trabajo W . Ejemplos de máquinas térmicas son las turbinas de vapor o de gas.

Para una máquina térmica ideal, como proceso reversible, se definen:

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$W/Q_1 < e_c, \text{ siendo } e_c = \text{Eficacia de Carnot} = 1 - T_2/T_1$$

En el caso de una máquina térmica real, proceso irreversible, es necesario considerar la eficiencia de la máquina, e_e :

$$W = e_e \cdot e_c \cdot Q_1, \text{ siendo } 0 < e_e < 1.$$

2. Bomba de calor (figura 3b): Dispositivo que funciona en sentido inverso al de una máquina térmica: Recibe un calor Q_2 a una temperatura T_2 , cede un calor Q_1 a una temperatura $T_1 < T_2$ y consume un trabajo W .

El ejemplo más típico de bomba de calor es una máquina frigorífica; sin embargo, en la práctica se emplea el término *bomba de calor* para referirse a equipos capaces de transformar trabajo en calor o frío, según convenga.

Para una bomba de calor ideal, como proceso reversible, se definen:

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$W/Q_1 > e_c, \text{ siendo } e_c = \text{Eficacia de Carnot} = 1 - T_2/T_1$$

En una bomba de calor real, proceso irreversible, es necesario considerar su eficiencia, ee :

$$W = e_c \cdot Q_1 / ee = Q_1 / \text{COP}, \text{ siendo } 0 < ee < 1 \text{ y COP el coeficiente de rendimiento.}$$

2.2.1.2 Integración de calor y potencia

Como hemos visto, en las máquinas térmicas y bombas de calor son necesarios fuentes y sumideros de calor que ceden o absorban el calor necesario para el funcionamiento del equipo. Precisamente las redes de intercambio de calor pueden actuar de ambas formas, ya que pueden requerir utilidades de calentamiento (sumideros de calor) y de enfriamiento (fuentes de calor); sin embargo, otros elementos de un proceso industrial pueden actuar también como fuentes o sumideros de calor (p.ej., un reactor endotérmico será un sumidero de calor).

La integración de calor y potencia se basa precisamente en el aprovechamiento de las fuentes y sumideros de calor del proceso y su integración con máquinas que, siguiendo los ciclos termodinámicos descritos, aprovechan ese exceso o déficit de calor.

Sin embargo, para esta integración es necesario considerar las mismas restricciones derivadas del pinch que las consideradas en la síntesis de redes de intercambiadores de calor.

En el diseño que lleva a la máxima recuperación energética (MER) vimos que son condiciones imprescindibles para alcanzar el MER que:

- a) Las utilidades de calentamiento se sitúen por encima del pinch: Es decir, por encima del pinch solo podremos ubicar fuentes de calor.
- b) Las utilidades de enfriamiento se sitúen por debajo del pinch: Es decir, por debajo del pinch solo podremos ubicar sumideros de calor.

Con estas dos reglas básicas, resulta sencillo relacionar el pinch con la ubicación de una máquina, tal y como se expone a continuación:

1. *Máquina térmica* (p.ej., turbina de vapor): Tendrá que ser instalada por encima o por debajo del pinch, pero nunca a través del pinch, es decir:

$$T_1 \text{ y } T_2 > T_{\text{pinch}} \text{ ó } T_1 \text{ y } T_2 < T_{\text{pinch}}.$$

Como se observa, pueden darse dos casos. Veamos las consecuencias de cada uno de ellos:

- a) *Integración por encima del pinch*: En este caso:
 - Se ahorran utilidades de calentamiento.
 - La eficacia marginal de la máquina así integrada puede llegar a ser del 100 %, ya que se aprovecha el calor Q_2 .

Por lo tanto, la ventaja es doble, tanto desde el punto de vista de la recuperación de calor en el proceso como del rendimiento de la máquina.

- b) *Integración por debajo del pinch*: En este caso:
- Se ahorran utilidades de enfriamiento.
 - Nuevamente, la eficacia marginal de la máquina puede alcanzar el 100 %, al aprovechar el calor Q_1 que, de otro modo, se perdería e incluso requeriría un gasto (utilidades).

Estas integraciones tienen, por otra parte, sus restricciones termodinámicas:

- Restricciones de temperatura:
 - a) Para que la máquina pueda ser ubicada por encima del pinch, T_2 ha de ser mayor que $T_{\text{pinch}} + \Delta T_{\text{min}}$.
 - b) Para que la máquina pueda ser ubicada por debajo del pinch, T_1 ha de ser menor que $T_{\text{pinch}} - \Delta T_{\text{min}}$.
- Restricciones de energía:
 - a) Por encima del pinch, para que la máquina alcance una eficacia marginal del 100 % el calor cedido por la máquina, Q_2 , ha de ser menor o igual que las utilidades de calentamiento requeridas en el proceso.
 - b) Por debajo del pinch, para que la máquina alcance una eficacia marginal del 100 %, el calor consumido por la máquina, Q_1 , debería ser menor o igual que las utilidades de enfriamiento requeridas en el proceso, salvo que el resto del calor que se libera pueda hacerse a la temperatura ambiente (en cuyo caso, las utilidades de enfriamiento no tendrían coste).

2. *Bomba de calor* (p.ej., una bomba de calor propiamente dicha): En este caso, el equipo debe situarse a través del pinch para una integración energética eficiente, puesto que el trabajo que consume la bomba se transforma en calor, que ayudará a compensar el déficit de calor que exista en el pinch (no olvidemos que el pinch es precisamente el intervalo de temperaturas con mayor déficit de calor).

- a) *Integración a través del pinch*: La bomba recibe un calor Q_2 de un foco frío a una temperatura T_2 por debajo del pinch ($T_{\text{pinch}} - \Delta T_{\text{min}}$), y consume un trabajo externo (p.ej., energía eléctrica) para ceder un calor Q_1 a una temperatura T_1 por encima del pinch ($T_{\text{pinch}} + \Delta T_{\text{min}}$).

Existe una segunda opción de integración de bomba de calor, no prohibida, que dará lugar a un ahorro energético menor que su instalación a través del pinch:

- b) *Integración por encima del pinch*: La bomba recibe un calor Q_2 a una temperatura T_2 que se encuentra por encima del pinch ($T_{\text{pinch}} + \Delta T_{\text{min}}$), y cede un calor $Q_1 > Q_2$ a una temperatura superior T_1 , también por encima del pinch, de manera que reduce las

necesidades de utilidades de calentamiento Q_{hu} . El ahorro energético neto será, como máximo: $Q_1 - Q_2 = W$.

En las tablas 10 y 11 se resume el resultado energético de una de las integraciones indicadas, tanto con máquinas térmicas como con bombas de calor.

Tabla 10. Integración de calor y potencia, máquina térmica

Sistema	Calor aportado a:	Calor cedido por:
Máquina Térmica	Q_1	Q_2
Red de Intercambio de Calor	Q_{hu}	Q_{cu}
Máquina+Red (por encima del pinch)	$Q_{hu} - Q_2 + Q_1 = Q_{hu} + W$	Q_{cu}
Máquina+Red (por debajo del pinch)	Q_{hu}	$Q_{cu} - Q_1 + Q_2 = Q_{cu} - W$

Tabla 11. Integración de calor y potencia, bomba de calor

Sistema	Calor aportado a:	Calor cedido por:
Bomba de Calor	Q_2	Q_1
Red de Intercambio de Calor	Q_{hu}	Q_{cu}
Bomba de Calor+Red (a través del pinch)	$Q_{hu} - Q_1 = Q_{hu} - Q_2 - W$	$Q_{cu} - Q_2$

2.2.2 Cogeneración

Una vez analizados los diferentes casos de integración de calor y potencia (trabajo), resulta evidente que los sistemas de cogeneración no son más que una particularización de algunos de los casos descritos y, por lo tanto, su diseño puede realizarse siguiendo la misma metodología general.

Como ejemplo de un sistema integrado de calor y potencia, se propone el diseño de un proceso con turbina de gas de ciclo abierto, asociado una variación del proceso 4S1 que se denomina 4S1t, para $\Delta T_{min} = 20$ °C; en esta variante, la corriente H2 tiene una capacidad calorífica de 15 kW/°C, manteniéndose el resto de las condiciones.

La potencia eléctrica a generar debe ser de 4500 kW, y las utilidades de enfriamiento se consiguen mediante la asociación de dos corrientes adicionales del proceso, 205 y 145 °C.

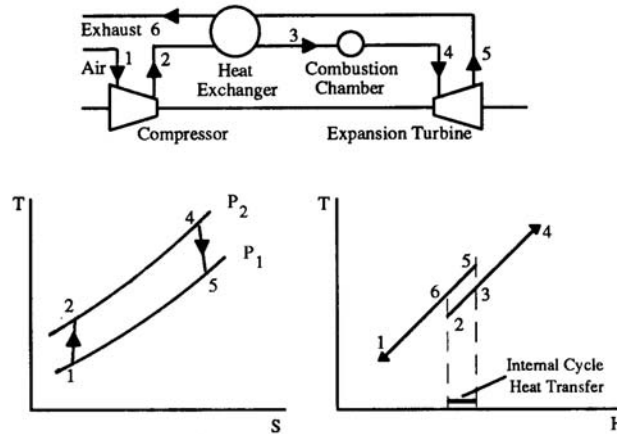


Figura 4. Esquema de una turbina de gas de ciclo abierto. (Fuente: Shenoy, 1995)

La figura 4 muestra un esquema de una turbina de ciclo abierto, ya que la temperatura de la última corriente de descarga corresponde a la ambiente. Este esquema sigue los procesos termodinámicos ideales:

1-2: Compresión isentrópica de gas.

2-4: Calentamiento isobárico del gas (precisa calor externo).

4-5: Expansión isentrópica del gas en un turbina, para producir energía mecánica, W .

5-6: Enfriamiento isobárico de la descarga de la turbina (libera calor).

En este esquema, T_5 es mayor que T_2 , de manera que es posible precalentar el gas con la corriente de descarga, antes de introducirlo en el hogar.

Como resultado, el proceso indicado dará lugar a la corriente de descarga de la turbina *Exht*, que se puede asociar al proceso 4S1t. En la tabla 11 se incluyen las propiedades de las corrientes y utilidades. De acuerdo con estas condiciones, parece probable que la asociación de esta turbina se produzca por el encima del pinch, si bien esta cuestión se verificará mediante el diseño integrado.

Tabla 11. Corrientes en la integración de 4S1t con una turbina de ciclo abierto. $DT_{min} = 20$ °C, salvo para *Exht*, que se establece en 30 °C.

Corriente	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	MC_p (kW/°C)
H1	175	45	10
H2	125	65	15
C3	20	155	20
C4	40	112	15
<i>Exht</i>	381,4	25	19,86
<i>LP</i>	145	145	
<i>IP</i>	205	205	

Una vez elaborada la PTA del proceso 4S1t y localizado el pinch, resultaría aparente que la turbina debe asociarse por encima del pinch.

En todo caso, la introducción de nuevas corrientes hace necesario un recálculo del pinch, incluyendo éstas. En este caso, se alcanza un nuevo pinch a 155 °C.

Finalmente, se diseña la red MER incluyendo la corriente de descarga de la turbina y las utilidades de enfriamiento, como se muestra en la figura 5.

En esta integración específica, y como ventaja adicional a la incorporación de la turbina, se eliminan las necesidades de utilidades de calentamiento estimadas en 4000 kW. En este caso particular, estas utilidades se integran con otras corrientes del proceso, LP e IP.

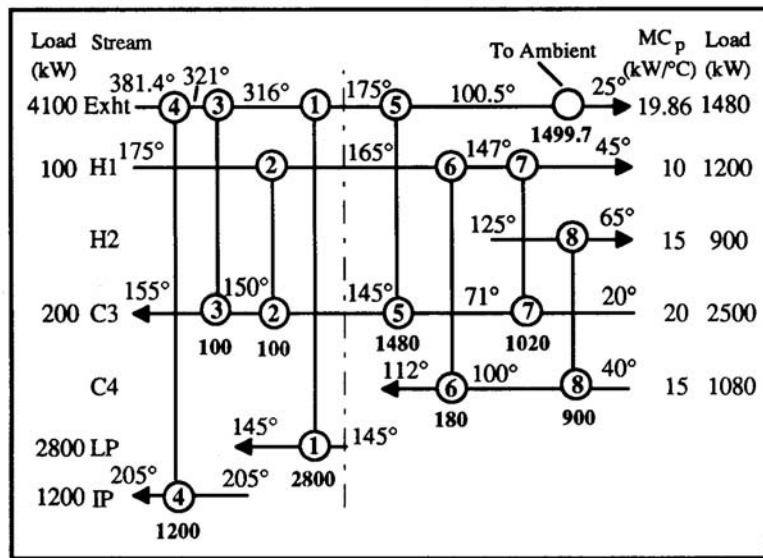


Figura 5. Red MER de turbina y 4S1t integrados. $\Delta T_{\min} = 20$ °C para las corrientes 4S1 y 30 °C para la corriente de descarga de la turbina. (Fuente: Shenoy, 1995)

Referencias

Linnhoff, B. "Process integration for the efficient use of energy" The Institution of Chemical Engineers (1982).

Shenoy, U.V. "Heat Exchanger Network Synthesis". Gulf Publishing Company, Houston (1995).

J.M. Smith, H.C. van Ness, M.M. Abbott: "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química". McGrawHill. México (2003).

Y.A. Çengel, M.A. Boles: "Termodinámica". McGrawHill. México (1996).

Suministro energético en edificios: bombas de calor y micro-cogeneración

Pastora M. Bello Bugallo, Laura Cristóbal Andrade, Marta Galera Martínez, Miguel A. Bernal Pampín

Departamento de Enxeñaría Química. Escola Técnica Superior de Enxeñaría. Universidad de Santiago de Compostela

1 Introducción

Los edificios tienen un gran impacto en el consumo energético a largo plazo. En el año 2010, los edificios suponían el 40% del total del consumo energético en la Unión Europea (UE, 2010). Aproximadamente el mismo porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero en países desarrollados tienen su origen en los equipos de los edificios, donde alrededor del 60% de las emisiones proceden de sistemas de acondicionamiento del aire (Pardo *et al.*, 2010). Sin embargo, el aprovechamiento energético en viviendas depende en gran medida de la arquitectura del edificio. Estos factores se incluyen en la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios (UE, 2002), que establece que la metodología de cálculo debe considerar el aislamiento, las características técnicas y de instalación, el diseño y distribución en relación a los aspectos climáticos, la exposición al sol y la influencia de las

estructuras vecinas, la propia generación energética y otros factores como el clima interior, que influencia la demanda energética. La Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (UE, 2009) también considera los sistemas de energía pasivos que aprovechan el diseño del edificio para obtener energía. Esta directiva también establece que, antes del final del año 2014, los Estados Miembros exigirán el uso de niveles mínimos de energía procedente de fuentes renovables en los edificios nuevos y en los ya existentes que sean objeto de una renovación importante. Los Estados miembros permitirán que dichos niveles mínimos se cumplan, entre otras cosas, mediante la calefacción y la refrigeración por sistema central producidas utilizando un porcentaje importante de fuentes de energía renovables (UE, 2009).

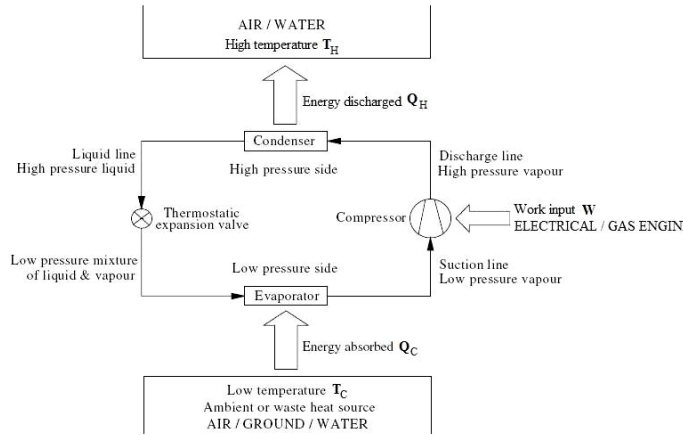
Las bombas de calor y la micro-cogeneración con aplicaciones residenciales son una alternativa para el ahorro energético y para la mejora de la eficiencia energética. Estas tecnologías permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia energética.

Este trabajo presenta una clasificación de estos conceptos en base a la termodinámica, y aporta clasificaciones claras considerando la bomba de calor y el ciclo de potencia como punto de partida. Se propone una revisión actualizada de las bombas de calor y de la micro-cogeneración que puede ser de gran importancia en el futuro para alcanzar los objetivos de la legislación europea. Se enfatizan especialmente los principios de operación y las ventajas de los sistemas propuestos.

2 Bombas de calor

2.1 Principios

Una bomba de calor es un sistema sometido a un ciclo termodinámico térmicamente comunicado con dos cuerpos localizados en los alrededores o focos térmicos. Se trata de equipos diseñados para emplear fuentes de energía a baja temperatura para calentar un espacio hasta una temperatura superior. La fuente de baja temperatura puede ser el aire, el suelo o un sistema hídrico cercano (un lago o un río). Su energía procede de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre y su utilización supone, por tanto, un uso indirecto de la energía solar (Aye y Charters, 2003). Por otro lado, el medio a calentar corresponde al circuito de calefacción, que normalmente funciona con agua o aire. Se requiere suministro energético en forma de electricidad, aunque también puede emplearse un motor mecánico. Los componentes del ciclo de una bomba de calor son el evaporador, el condensador, el compresor y la válvula de expansión (Figura 1).



$$W = Q_H - Q_C \quad \text{Eq. (1)}$$

$$COP = \frac{Q_H}{W} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$COP = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$COP_{m\acute{a}x} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad \text{Eq. (4)}$$

Figura 1. Esquema típico de una bomba de calor.

El objetivo de una bomba de calor es mantener la temperatura de una estancia por encima de la del exterior. De acuerdo con los flujos de energía, el balance energético se define por medio de la ecuación Eq. (1). El Coeficiente de Operación (COP) de una bomba de calor se calcula como la cantidad de energía descargada desde el ciclo al foco caliente dividido por la energía requerida para ello (Eq. (2)). Como Q_H es mayor que Q_C , COP nunca es menor que la unidad, aunque su valor máximo también está limitado. El máximo COP de un ciclo reversible de bomba de calor se obtiene considerando las temperaturas de los focos frío y caliente (Eq. (4)). En cualquier caso, y a pesar de estas limitaciones, son preferibles los valores elevados de COP.

2.2 Clasificación de bombas de calor

2.2.1 Tipo de ciclo termodinámico

La clasificación en función del ciclo termodinámico considera los principios de operación de las bombas de calor. Existen tres tipos de bombas de calor (Figura 2). Las bombas de calor de compresión de vapor (*Vapor-Compression Heat Pumps, VCHPs*) se utilizan típicamente para calefacción. Cuentan con un compresor mecánico y requieren energía mecánica. Las bombas de calor de absorción de vapor (*Vapor Absorption Heat Pumps, VAHPs*) también se usan para calefacción y requieren un aporte de energía térmica. Ambos sistemas implican un cambio de fase, mientras que en los sistemas de refrigeración con gas el fluido refrigerante se mantiene en estado gaseoso. El ciclo de refrigeración de *Brayton* es un importante sistema de refrigeración (Moran y Shapiro, 2006) y por tanto puede funcionar también como una bomba de calor (Chen et al., 1999).

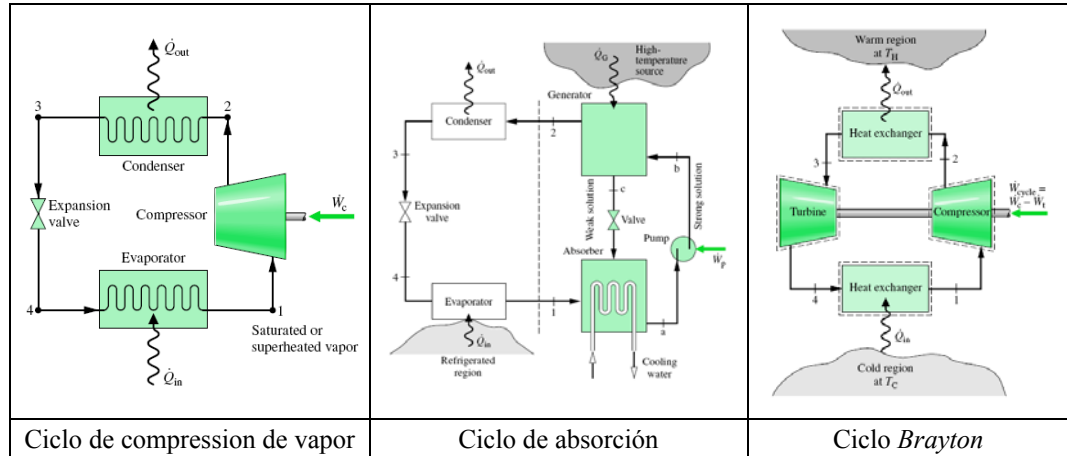


Figura 2. Diagramas de los principales ciclos de refrigeración o bombas de calor (*Moran y Shapiro, 2006*).

2.2.2 Equipamiento

De acuerdo con la Figura 1, y dependiendo del tipo de equipos que la bomba de calor utiliza para operar, pueden establecerse distintas clasificaciones:

Evaporador. Según los equipos empleados para evaporar el fluido refrigerante se establece un criterio de clasificación según el tipo de intercambiador de calor, ya que pueden considerarse intercambiadores con diferentes disposiciones de carcasa y tubos, colectores solares, etc., en función del foco frío. Un caso particular es el sistema de bomba de calor solar (*Solar Assisted Heat Pump, SAHP*), que combina la bomba de calor con tecnología solar, empleando la radiación solar como fuente de calor. Este sistema permite mejorar el COP de la bomba de calor, y por tanto la eficiencia de conversión energética. En España el término comercial es “célula solar termodinámica”, que surgió en 2006. Desde el punto de vista comercial, socialmente es más impactante hablar de “células solares” que de “bombas de calor”, ya que el primer término tiene connotaciones positivas (ecológico, renovable, etc.), que no se asocian a las bombas de calor. Sin embargo, una “célula solar termodinámica” es realmente una *SAHP*. *Ozgener y Hepbasli (2007)* propusieron una clasificación de *SAHPS (Solar Assisted Heat Pump System)*: (i) *SAHPSs* para calentar agua; (ii) *SAHPSs* con almacenamiento para calentamiento de espacios (convencional); (iii) *SAHPSs* con expansión directa para calentar espacios; y (iv) *Solar-Assisted Ground Source Heat Pump Greenhouse Heating System (SAGSHPGHS)*. *Ji et al (2008)* propusieron otra bomba de calor asistida por energía solar fotovoltaica (*Photo-Voltaic Solar Assisted Heat Pump, PV-SAHP*), capaz de proporcionar frío o calor así como agua caliente. Los paneles solares son realmente un ensamblado de células fotovoltaicas laminadas sobre la placa del evaporador-colector, lo que permite la absorción directa de energía solar y, por tanto mejoran la protección del evaporador durante las heladas en invierno. Empíricamente han demostrado que el COP máximo se obtiene cuando la

irradiación solar es máxima, con un valor de 10,4. Por tanto, los sistemas *PV-SAPH* son mejores que las bombas de calor convencionales.

Compresor. En las bombas de calor con motor de gas (*Gas Engine Heat Pumps, GEHPs*) el compresor que funciona con gas (gas natural, propano o LPG) alimentado por un motor de combustión interna en lugar de electricidad.

Válvula. Existen dos tipos de bombas de calor en función del tipo de válvula: bombas de calor reversibles (invertida) y bombas de calor irreversibles, según la válvula sea de cuatro o de dos vías.

2.2.3 Fuente de energía

Las bombas de calor requieren energía en forma de trabajo (W), por lo que pueden clasificarse como bombas de calor eléctricas (*Electric-driven Heat Pumps, EHPs*) y bombas de calor de gas (*Gas Engine Driven Heat Pump, GEHPs*).

2.2.4 Foco frío

Según la Directiva 2009/28/CE las bombas de calor pueden emplear energía aerotérmica, geotérmica o hidrotérmica. Consecuentemente pueden clasificarse como bombas de aire, suelo o agua, dependiendo del foco térmico que empleen. Sin embargo también existen bombas de calor híbridas, que combinan, por ejemplo, suelo/aire, o las bombas solares de aire/agua.

2.2.4.1 Air-source heat pumps

Son las más comunes. Esta categoría incluye bombas de calor aire-aire y aire-agua. La energía solar se almacena en el aire, por lo que este tipo de bombas utiliza de forma indirecta la energía solar. Operan empleando ventiladores para hacer circular el aire a través del evaporador. El inconveniente es que su eficiencia está influenciada por la variación de la temperatura del aire ambiente. Si la temperatura cae por debajo de 4°C , puede formarse hielo en el evaporador, disminuyendo la eficiencia. La principal ventaja en comparación con las *GSHPs* es que los costes de inversión son menores.

2.2.5 Ground-Source Heat Pumps (GSHPs)

GSHPs también son conocidas como bombas de calor geotérmicas. *Yang et al* (2010) clasificaron estos sistemas de acuerdo con la fuente de donde se absorbe la energía. Esto implica que el foco frío puede ser el suelo, agua del subsuelo o agua superficial, distinguiendo tres categorías: (i) *Ground-Coupled Heat Pump (GCHP)*; (ii) *Ground Water Heat Pump (GWHP)*; y (iii) *Surface Water Heat Pump (SWHP)*. También pueden clasificarse de acuerdo con el lazo: lazo abierto (*ground coupled*) o lazo cerrado (*water source*) (*Ozgener y Hepbasli, 2007*). La mayor ventaja es que la temperatura del subsuelo permanece prácticamente constante durante todo el año, por lo que esta tecnología ofrece una eficiencia energética mayor. Sin embargo, en el caso de *SWHP*, la temperatura del agua superficial está influenciada por las condiciones climáticas. Las tuberías pueden enterrarse de forma horizontal o

vertical. El sistema horizontal es más barato que el vertical, pero requiere mayor área y está más influenciado por la temperatura del aire ambiente.

2.2.6 Water-Source Heat Pumps (WSHPs)

WSHPs obtienen calor de un sistema hídrico. Puesto que emplean agua de la tierra como fuente de energía, pueden incluirse también en la categoría de *GSHP*, mostrada en el epígrafe 2.2.4.2, donde *SWHP* emplean un lago en lugar de un pozo como en el caso de *GWHP*.

2.2.7 Foco caliente

No es frecuente clasificar las bombas de calor en función del foco caliente. Es más común considerar la relación entre los focos frío y caliente, tal y como se explica en el siguiente epígrafe.

2.2.8 Foco frío – foco caliente

Los diferentes tipos de bombas de calor pueden determinarse en función de la combinación de fuente de calor y sumidero (donde el calor absorbe, y donde el calor se descarga, respectivamente) (El instalador, 2008). El foco frío se emplea como fuente de calor, y puede ser el aire, el suelo o el agua. Dependiendo de la naturaleza del foco caliente, existen dos posibilidades: aire o agua, según el objetivo. Por ejemplo, las bombas de calor aire-agua transfieren calor desde el aire ambiente, que se emplea como foco frío, al agua para calentar el espacio (radiadores o sistemas de calentamiento bajo el suelo) o para producir agua caliente (*Toshiba*). Por otro lado, las bombas de calor aire-aire operan transfiriendo calor desde el aire del exterior hacia el interior del edificio, donde se distribuye mediante aire en movimiento. También existen otros sistemas (*Pither y Doyle, 2005*): suelo-agua, suelo-aire, agua-agua y agua-aire. Esta nomenclatura es más empleada en el sector comercial, aunque también puede encontrarse en documentos científicos. En la esfera comercial también pueden encontrarse combinaciones como sol-agua y sol-aire, cuando se emplean colectores solares para obtener calor (*Onovwiona y Ugursal, 2006*).

3 Micro-cogeneración

La micro-cogeneración, también llamada *Micro-Combined Heat and Power (MCHP)* o cogeneración residencial, es una tecnología que permite producir energía térmica útil y electricidad a partir de una única fuente. El combustible se emplea de forma más eficiente (Figura 3), ya que el intercambiador de calor recupera calor residual del motor y/o gases de escape para producir agua caliente o vapor (*Goodell, 2010*).

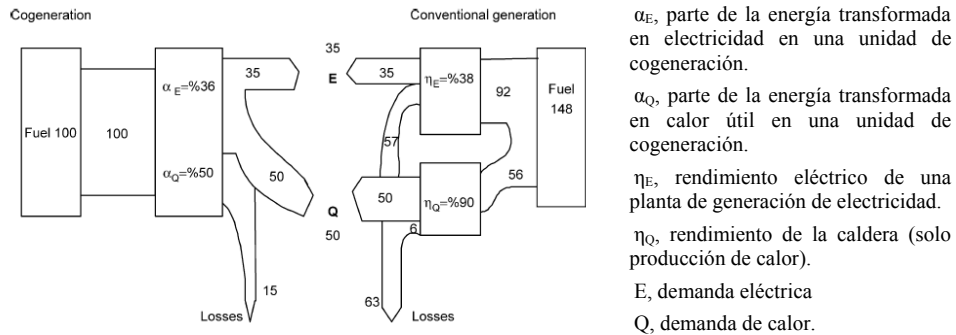


Figura 3. Diferencia en el consumo de energía primario requerido para producir la misma cantidad de calor y energía empleando generación de energía convencional mediante combustible fósil y caldera en comparación con un sistema de cogeneración (Onovwiona y Ugursal, 2006).

La implementación a pequeña escala (<10kW) o cogeneración es la solución que aporta todas las ventajas de la cogeneración, como ahorro de energía y emisiones controlables y predecibles, descentralización energética, seguridad en el suministro, etc. (Arzoz del Val, 2009).

3.1 Clasificación

Existen una gran variedad de sistemas de cogeneración disponibles en el mercado (Tabla 1). La elección del sistema depende de factores como la demanda de potencia y de calor, la fuerza motriz, los costes de instalación y mantenimiento, etc. Algunos sistemas se han desarrollado para micro-cogeneración, y sus condiciones de operación se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Tecnologías de cogeneración (Comisión Europea, 2009).

<i>Tecnología de cogeneración</i>	
<i>Ciclo combinado de turbine de gas</i>	<i>Células de combustible</i>
<i>Turbina de extracción de vapor condensado</i>	<i>Micro-turbinas</i>
<i>Motores de combustion interna</i>	<i>Motores Stirling</i>
<i>Plantas de turbinas de vapor</i>	<i>Motores de vapor</i>
<i>Turbinas de gas con calderas de recuperación</i>	<i>Ciclo Ranking orgánico</i>

Tabla 2. Tecnologías de micro-cogeneración (*Energylab*, 2010).

Tecnología	η_E (%)	η_Q (%)	η_T (%)	Carga mínima (%)	T (°C)	Ruido (dB)	Combustible
Turbina de gas	15-35	40-59	60-85	75	450-800	62-75	Gas natural
Motor de combustión interna alternativo	25-45	40-60	70-85	50	300-600	52-56	Gas, diesel, biocombustible
Motores <i>Stirling</i>	25-50	40-60	70-90	50	300-600	56	All
Células de combustible	35-55	40-60	70-90	No limit	250-550	Baja	H ₂

η_E : electric yield; η_Q : thermal yield; η_T : total yield; T: temperature

3.1.1 Motor de combustión interna recíproco

Estos motores se clasifican según su sistema de ignición: motores de ignición por compresión (*Diesel*) y motores de ignición por chispa (*Otto*). Los motores *Otto* se utilizan en micro-cogeneración gracias a su sistema de recuperación de calor capaz de generar agua caliente a 160°C. En comparación, los motores *Diesel* producen agua caliente a temperatura menor. Sus eficiencias oscilan entre 25-45%. La mayor ventaja es que es una tecnología madura y bien comprendida. Pueden diseñarse para emplear diferentes combustibles, aunque requiere frecuentes revisiones de mantenimiento. Por otro lado, puesto que esta tecnología requiere quemar combustibles fósiles, tiene asociada la emisión de contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), y compuestos orgánicos volátiles (COV- sin quemar, hidrocarburos excepto el metano).

3.1.2 Micro-turbinas

Sus componentes básicos son el compresor, el generador de turbina y el recuperador. El proceso termodinámico implica la presurización del aire en el compresor. El aire comprimido y el combustible se mezclan y se produce la ignición en la cámara de combustión. El gas de combustión caliente resultante se expande moviendo la turbina, que mueve el compresor y aporta energía girando la turbina del compresor. En el recuperador, los gases de combustión calientes ayudan a pre-calentar el aire al pasar por el compresor hacia la cámara de combustión. Así se mejora la eficiencia del sistema.

En principio, la micro-cogeneración compite con la tecnología de bombas de calor, pero realmente se complementan una a la otra. Por ejemplo, la electricidad no utilizada generada mediante micro-cogeneración puede emplearse para cubrir las necesidades de calefacción y refrigeración de una bomba de calor. *Ehyaei y Bahadori* (2007) mostraron cómo el exceso de electricidad generado en micro-cogeneración podía emplearse en las bombas de calor. Esta tecnología ofrece un alto grado de calor residual y otras ventajas como un tamaño compacto, poco peso, poco mantenimiento y menos ruido que otras tecnologías. Sin embargo, en bajos rangos de potencia, los motores de combustión interna recíprocos tienen mayor eficiencia. También se producen contaminantes (aunque en menor cantidad que en los motores de

combustión interna recíprocos) como NO_x, CO, hidrocarburos y significativas cantidades de SO₂.

3.1.3 Células de combustible

La tecnología de células de combustible es una tecnología emergente con un gran potencial para las aplicaciones de cogeneración, y está actualmente desarrollándose para aplicaciones residenciales (3-10 kW). Puede funcionar de forma independiente o en paralelo con una red energética (*US Fuel Cell Council*). La reacción electroquímica del hidrógeno y el oxígeno en presencia de un electrolito produce electricidad sin combustión ni trabajo mecánico. Los únicos sub-productos son agua y calor. Las células de combustible normalmente funcionan con hidrógeno, aunque también pueden emplear gas natural, propano u otros combustibles mediante reformado interno o externo, o mediante la electrolisis del agua. Entre las ventajas destaca el bajo nivel de ruido, poco mantenimiento, bajas emisiones y potencial para alcanzar una eficiencia total del 85-90% incluso en pequeños equipos. La célula de combustible es la tecnología más prometedora y gradualmente está comenzando a estar disponible, aunque aún existe el problema de los grandes costes y del tiempo de vida relativamente corto.

3.1.4 Motor Stirling

El motor *Stirling* es un motor de combustión externa operado mediante el ciclo *Stirling*, que todavía no ha sido completamente desarrollado. El ciclo consiste en cuatro procesos reversibles en serie: compresión isoterma, calentamiento a volumen constante, expansión isoterma y enfriamiento a volumen constante. El motor de ciclo *Stirling* puede emplear diferentes fuentes de energía renovables incluyendo biomasa y energía solar y geotérmica (*Scarpete*), por lo que ofrece oportunidades para grandes eficiencias y bajas emisiones. Puede operar con una gran variedad de combustibles, el mantenimiento es sencillo y la vida útil normalmente larga.

La principal desventaja es su alto coste. Los motores *Stirling* se clasifican según su estructura: *Alpha*, *Beta* y *Gamma*. Esta tecnología junto con las células de combustible para cogeneración parecen ser las tecnologías más prometedoras para aplicaciones residenciales y comerciales a pequeña escala.

4 Conclusiones

Las bombas de calor ofrecen una alternativa eficiente y económica para los sistemas de ventilación, calefacción y acondicionamiento de aire con aplicaciones residenciales. De acuerdo con la nueva legislación europea, las bombas de calor pueden considerarse una tecnología basada en energías renovables, ya que se basan en recursos ilimitados, como el aire, el agua o el suelo. La micro-cogeneración es una tecnología emergente que produce energía térmica útil y electricidad mediante una única fuente de combustible, en el lugar de consumo o cerca del mismo. Aunque las bombas de calor y la micro-cogeneración requieren menos energía que los sistemas convencionales, requieren energía, que habitualmente se toma de la red de distribución donde normalmente el combustible se convierte en electricidad y

el calor residual se descarga al medio. Por tanto, no es exactamente correcto clasificarlas con tecnologías en base a fuentes de energía renovable. Por ejemplo en España, las compañías que suministran energía renovable ofrecen energía geotérmica para edificios. Sin embargo esta energía es una energía geotérmica “falsa”, ya que emplea energía solar absorbida por el suelo. La energía geotérmica real emplea la energía térmica almacenada en la Tierra. En cualquier caso se trata de tecnologías muy eficientes que pueden implicar un gran cambio en el sistema de distribución energético actual basado en la generación centralizada, y que pueden dar lugar a la generación distribuida. Este sistema minimizaría las pérdidas energéticas debidas a la transmisión de electricidad y al sistema de distribución. Se dispondría de plantas generadoras cercanas a los puntos de consumo, y la eficiencia energética aumentaría. Además, podría recuperarse hasta el 80% del calor residual de la combustión.

Considerando las bombas de calor impulsadas por electricidad, la generación distribuida con aporte de recursos renovables como la energía solar fotovoltaica es una buena opción, sobretodo en Europa gracias a su potencial de energía solar (Šúri *et al.*, 2007), especialmente en el sur.

Según la legislación española, las tecnologías propuestas son también una buena alternativa para el suministro energético en viviendas. Además suponen una oportunidad para cambiar el sistema actual de distribución de energía (basado en grandes plantas de generación de electricidad lejos de los puntos de consumo) a un nuevo sistema de generación donde la electricidad se genere y consuma en el mismo lugar. La generación distribuida tiene potencial para reducir las pérdidas asociadas a la transmisión eléctrica y a las ineficiencias del sistema de distribución. También permitirían reducir los problemas asociados a los picos de demanda.

Estas tecnologías son una gran oportunidad para aprovechar las fuentes de energía renovables. Las plantas de ciclo combinado (*Combined Heat and Power, CHP*) pueden integrar otros combustibles o tecnologías como la biomasa, la energía geotérmica o los colectores solares. Sin embargo, estos cambios no tienen sentido fuera del campo de la construcción bioclimática.

Referencias

- Arzoz del Val, D. (2009). Energy saving in buildings by small-scale cogeneration (in Spanish). *El instalador magazine*, **466**, 70-72.
- Aye, L., Charters, W.W.S. (2003). Electrical and engine driven heat pumps for effective utilisation of renewable energy resources. *Applied Therm. Eng.* **23**, 1295-1300.
- Comisión Europea (2009). Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS).
- Chen, L., Ni, N., Wu, C., Sun, F. (1999). Performance analysis of a closed regenerated Brayton heat pump with internal irreversibilities. *Int. J. Energy Res.* **23**, 1039-1050.

Ehyaei, M.A., Bahadori, M.N. (2007). Selection of micro turbines to meet electrical and thermal energy needs of residential buildings in Iran. *Energy Build.* **39**, 1227-1234.

El instalador (2008). Bombas de calor como fuente de energía renovable. *El instalador magazine.* **458**, 5-8.

Energylab (2010). Electricity micro-cogeneration: concepts, typology and results (in Spanish). Plenary Conference on the Electricity micro-cogeneration Seminar.

Goodell, M. (2010). About the Renewable Energy Institute. *Climate Science & America's Clear and Present Danger* (available at <http://cogeneration.net/>).

Ji, J., Pei, G., Chow, T., Liu, K., He, H., Lu, J., Han, C. (2008). Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. *Solar energy.* **82**, 43-52.

Moran, M.J., Shapiro, H.N. (2006). Fundamentals of engineering thermodynamics. *Wiley*, 5th edition.

Onovwiona, H.I., Ugursal, V.I. (2006). Residential cogeneration systems: review of the current technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **10**, 389-431.

Ozgener, O., Hepbasli, A. (2007). A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **11**, 482-496.

Pardo, N., Montero, A., Martos, J., Urchueguía, J.F. (2010). Optimization of hybrid – ground coupled and air source – heat pump systems in combination with thermal storage. *Applied Therm. Eng.*, **30**, 1073-1077.

Pither, A., Doyle, N. (2005). UK Heat Pump Study (available at Energy Efficiency Partnership for Homes, <http://www.eeph.org.uk>).

Scarpete, D., Uzuneanu, K., Badea, N. Stirling Engine in Residential Systems Based on Renewable Energy, (available at <http://www.wseas.us>).

Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., Ossenbrink, H.A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, **81**, 1295-1305 (available at <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>).

Toshiba, Air to water heat pump system, (available at <http://www.toshiba-aircon.jp>).

UE, (2002). Directiva 2002/91/EC relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, **L1**, 65-71.

UE, (2009). Directiva 2009/28/EC relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, **L140**, 16-62.

UE, (2010). Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, **L153**, 13-35.

US Fuel Cell Council, www.usfcc.com.

Yang, H., Cui, P., Fang, Z. (2010). Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy.* **87**, 16-27.

Aspectos termodinámicos de los motores de microgeneración

Manuel Bao Iglesias

*Depto. de Enxeñaría Química. Escola Técnica Superior de Enxeñaría.
Universidade de Santiago de Compostela*

1 Introducción

La transformación de energía calorífica en mecánica (que puede transformarse en eléctrica con rendimiento elevado) puede ser efectuada por distintos tipos de mecanismos que se clasifican como:

- Máquinas de combustión interna - típicamente ciclos Otto, Diesel y turbinas de gas (de Felipe, EUPT)
- Máquinas de combustión externa – Máquina de vapor o Ciclo Rankine y turbinas
- Máquinas no directamente, incluíbles en las anteriores como: Ciclo *Erickson*, Motor *Stirling*, ciclo de *Atkinson*, propulsión a chorro, etc.

Todas ellas tienen en común que el ciclo se desarrolla utilizando una sustancia en estado gaseoso que, en etapas de expansión, pueden accionar elementos mecánicos (émbolos o turbinas) y cuyo trabajo es susceptible de ser aprovechado para acondicionar el gas en etapas previas a la expansión y, el excedente puede ser aprovechado exteriormente.

Cualquier dispositivo que utilice un gas como sustancia circulante en el ciclo está sometido a las limitaciones que impone la termodinámica y, estas, se resumen en el principio de Carnot: ningún dispositivo mecánico que funcione entre dos temperaturas definidas puede tener mayor rendimiento que el de un ciclo de Carnot que funcione entre dichas temperaturas por lo que el aprovechamiento de la energía térmica procedente de un foco de alta temperatura exige la cesión de una cierta cantidad de calor a otro foco de temperatura más baja lo que permite afirmar que “ es imposible transformar calor en trabajo mecánico por simple enfriamiento de un foco térmico” – necesariamente ha de disponerse de un “sumidero “ de calor a temperatura inferior.

2 Problemática del uso de equipos disponibles para producción de energía a niveles de usuario actual y su posible integración en microrredes

El uso de combustibles convencionales, derivados líquidos del petróleo o el gas natural no parece que tengan futuro por no poder competir con las grandes instalaciones (economía de escala). A nivel doméstico ya sea por captación de energía solar térmica, por uso de biomasas diversas o por disponibilidad de focos térmicos de temperatura media- que suelen presentar problemas de emisión o costes de refrigeración-, la situación es que es posible disponer de focos térmicos de temperatura del orden de los 250 °C, muy superior a la operativa de una red térmica de calefacción , que podrían ser utilizados para producción de energía eléctrica en instalaciones de baja potencia integrables en una microrred y para lo que se intuyen tres tipos de equipos a utilizar:

- a) Equipos basados en la máquina de vapor que operen a 20 bares aproximadamente y cuya tecnología es bien conocida aunque sus rendimientos en producción de energía mecánica/eléctrica son bajos (<15%) para el intervalo de presiones y temperaturas asociables que habrían de ser amortizados por los retornos de calor y electricidad
- b) Equipos basados en el ciclo de la turbina de gas, en circuito cerrado, con calefacción externa y gas a definir que podría operar en aquellos lugares en los que sí hay disponibilidad de energía térmica del origen definido anteriormente pero fuerte escasez de agua (zonas desérticas).
- c) Motores tipo Stirling de los que ya existe un cierto nivel de producción.
- d) Motores de combustión interna, de ciclos convencionales, que utilicen combustibles “elaborados” a partir de materiales disponibles (biogás, biodiesel, etanol, gasificación, etc.)

Referencias

Máquinas de combustión interna: de Felipe, J.J. Ciclos termodinámicos ideales de los motores endotérmicos alternativos. Laboratori de Mecànica de Fluids i Motors Tèrmics. E.U.P.M. departament De Màquines Tèrmics. U.P.C.

Máquinas de combustión externa:

- El ciclo Rankine: Tomás Gómez-Acebo. Ciclos con vapor. Tecnun. Campus tecnológico de la Universidad de Navarra.
- La turbina de gas: Oscar Guzmán Virgen. Turbinas de gas. Ciclos termodinámicos ideales. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.

Gasificación de productos hidrocarbonados: Antero Moilanen. Thermogravimetric characterisations of biomass and waste for gasification processes. VTT Publications 607, 2006.

Tecnologías de gasificación a pequeña escala: Eric D. Larson. Small-Scale Gasification-Based Biomass Power Generation. Biomass Workshop. Changchun, Jilin Province, China 12-13 January 1998.

Motores utilizables: Directorio de motes alternativos para cogeneración. Energuia.

Variantes con solubilización previa y variantes con pregasificación: Paviet, F., Bals, O., Antonini, G. Kinetic study of various chars steam gasification. International Journal of Chemical Engineering. Volume 5, 2007.

Microgeneración: solución altamente eficiente para sistemas de calefacción y ACS en el sector terciario

Rafael Areso Goiricelaya

Delegado BaxiRoca Solutions

1 Introducción

En el consumo de energía, dónde los edificios representan el 40% de la demanda total final, se puede destacar:

Unos precios energéticos crecientes, y ya no sólo debido a las situaciones geopolíticas sino también al aumento de la demanda mundial de combustibles fósiles, que son limitados en el tiempo.

Por otro lado cabe destacar una mayor conciencia ambiental, tanto a nivel público como privado.

Y consecuentemente, una legislación cada vez más exigente.

En esta situación actual, y en general, los edificios de nueva construcción obtienen una calificación energética E, D o a lo sumo C.

Solo edificios de nueva construcción, con un proyecto claramente orientado a ello, obtienen hoy en día una calificación energética A o B. Se les podría llamar edificios singulares.

Los edificios existentes tendrían una calificación energética F o G, calificación que está pendiente de aprobarse el RD de certificación por el M^o de Industria.

Así, el Código Técnico de la Edificación, ha cambiado ya la forma de proyectar instalaciones térmicas en edificios desde el año 2007, destacando la incorporación de tecnologías como la solar térmica o la microgeneración en todo tipo de edificios de nueva planta, y la certificación energética de edificios, un examen que debe pasar el edificio en términos de emisiones de CO₂, apoyado con herramientas como el Calener.

La transposición de la directiva de la Unión Europea sobre el fomento de renovables en España, se espera a principios del año 2012, donde la participación de equipos como paneles solares, bombas de calor, calderas de biomasa y equipos de microgeneración, serán protagonistas indiscutibles, junto a las calderas de condensación.

¿Cuál es la nueva y próxima situación?

La nueva directiva impondrá en dos fechas, 2018 para los edificios públicos y 2020 para todos los edificios, la obligatoriedad de considerar el edificio como un consumidor a la vez que generador de energía, para el abastecimiento de sus necesidades, con un objetivo de reducir al máximo la dependencia energética de las actuales redes de suministro.

La manera de conseguir que un edificio tenga un balance energético nulo se consigue con la combinación de 3 factores decisivos:

La mejora de los aislamientos de la envolvente del edificio (junto a la reducción de la demanda).

El uso de equipos eficientes (condensación, microgeneración, etc.).

Y el uso de energías renovables (solar térmica, solar fotovoltaica, bombas de calor, etc.).

Pero además también entrará en vigor la directiva de diseño ecoeficiente sobre productos que usan energía, con un análisis completo del ciclo de vida de los mismos, es decir, se valorará incluso el impacto medioambiental del desguace del equipo al final de su vida útil.

Y finalmente, se tendrá que cumplir también el etiquetado energético de equipos, donde se deberá informar no sólo del consumo del equipo sino de las prestaciones de una instalación completa formada por diferentes tipos de circuitos.

En este capítulo veremos la tecnología de producción de calefacción y ACS mediante micro-cogeneración, que ayuda a conseguir los objetivos presentes y futuros, aportando un grado elevado de eficiencia energética.

2 Equipos de microgeneración

2.1 Principios básicos de la microgeneración

El principio de la microgeneración (CHP) es extremadamente simple. Con esta tecnología, un equipo crea simultáneamente energía térmica y eléctrica, que puede aprovecharse en el mismo edificio.

A fin de diferenciar entre una instalación de cogeneración accionada por turbinas y otra accionada por un motor, se introdujo el término central de producción combinada de electricidad y calor a motor, para definir una relación clara del proceso de cogeneración. Como motores de accionamiento se utilizan motores de combustión interna para el funcionamiento con gas, motores diesel para el funcionamiento con gasoil, menos frecuentemente también motores de reacción para el funcionamiento combinado con gas y gasoil. Estos motores son fijos o están unidos mediante un acoplamiento al generador e instalados juntos en un bastidor. Por lo general, en el caso de módulos más pequeños las centrales se integran de forma compacta en la carcasa de protección acústica de manera que la central de cogeneración se fabrica lista para la conexión como una unidad. También se integran los intercambiadores de calor, que enfrían los gases de escape, el motor, el aceite lubricante y, a menudo, también el generador y que permiten aprovechar el calor generado gracias a un circuito de agua independiente.

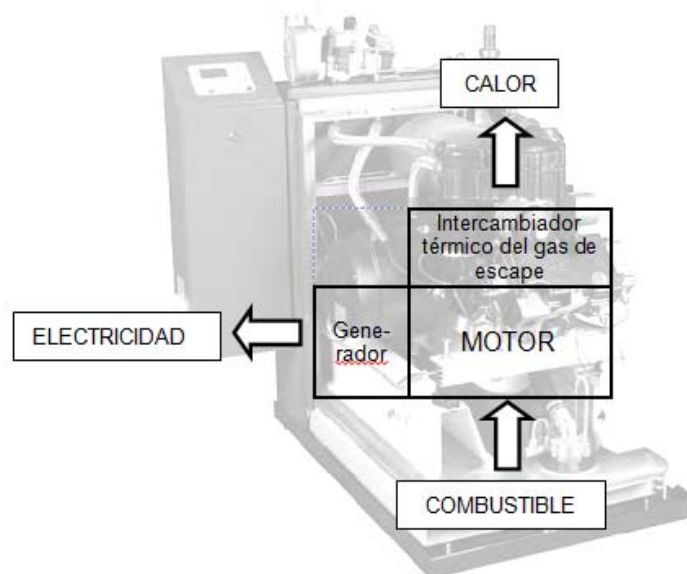


Figura 1. Principio de cogeneración de electricidad y calor.

Como la transformación de la energía primaria mediante la combustión es un proceso térmico intensivo, por lo general sólo el 25 - 30 % de la energía utilizada se transforma en movimiento mecánico. El 70 - 75 % restante se transforma en calor, que entonces es captado por el correspondiente sistema

de intercambio térmico, y conducido a un proceso de calefacción o agua de servicio. Así el rendimiento total aumenta a aproximadamente un 90%, el aprovechamiento efectivo de la energía primaria se maximiza y, en comparación con la generación de electricidad y calor por separado, se obtiene un ahorro de energía primaria de aproximadamente el 30%. A esto se une también una reducción en la emisión de sustancias nocivas, que suponen cerca de un 47 % de las emisiones de CO₂ y un 25 % de las emisiones de NO_x.

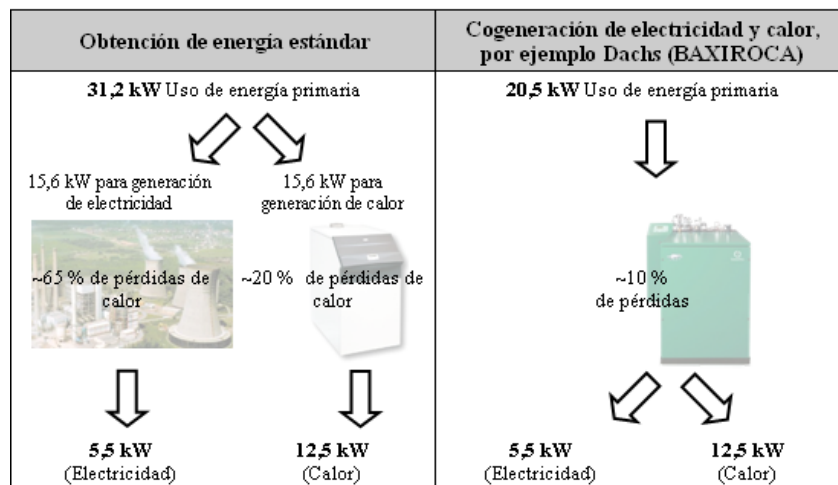


Figura 2. Comparación de la cogeneración en el ejemplo del Dach's con la obtención de energía estándar.

Así pues, se observa como en comparación con la obtención de energía estándar, en el caso de la generación combinada de electricidad y calor, el consumo de combustible es aproximadamente un 30% más bajo y la emisión de CO₂ anual hasta 20 toneladas inferior.

2.2 Componentes de un equipo de microgeneración mediante motor alternativo

Un equipo de microgeneración con motor de combustión interna es una máquina completa, compacta y lista que genera, en el caso concreto del equipo Dach's (BAXIROCA), 5,5 kW de potencia eléctrica y 12,5 kW de potencia térmica.

Este tipo de equipos tienen unas dimensiones alrededor de 100 x 70 x 100 cm (Alto x Ancho x Profundidad) y un peso aproximado de 500 kg. Requiere una superficie de instalación de aprox. 1m², al incluir el espacio libre necesario para los trabajos de mantenimiento es necesario un espacio de 3,5 m² por módulo. Cabe la posibilidad de conectar varios módulos en una misma instalación, en cascada.

La regulación por microprocesador con supervisión de red contiene todas las funciones de control y regulación para la instalación, el registro interno de los valores de medición, la técnica de seguridad del lado de salida de gases así como todas las supervisiones requeridas para un funcionamiento seguro en paralelo de la central conectada a la red de baja tensión. Estos equipos deben poseer un distintivo CE y el certificado de prueba del tipo CE de conformidad con la directiva CE para dispositivos de gas.

El motor y el generador están montados sobre un bastidor de baja tendencia a las vibraciones. Sobre el motor está colocado el intercambiador térmico de los gases de escape con un catalizador de oxidación o filtro antipartículas integrado. Para mantener las pérdidas de la transformación termodinámica lo más bajas posible, el agua de calefacción fluye directamente a través del equipo. Este modo de proceder ha dado buenos resultados y permite una fácil integración en el sistema de calefacción. Se refrigera el generador, el aceite lubricante, el propio motor y, por supuesto, el gas de escape.



Figura 3. Componentes del Dachs (BAXIROCA).

Estos equipos incorporan un motor alternativo de cuatro tiempos monocilíndrico, con un cubicaje alrededor de los 600 cm³ que ofrece, con un mantenimiento preventivo adecuado, una larga vida útil.

En cuanto al generador, éste puede ser síncrono o asíncrono. En el caso de estos últimos, el motor especial acciona directamente el generador a través de una pareja de ruedas dentadas. Si se produce una desconexión en la red pública de una o más fases por parte de la empresa de suministro eléctrico, se activan los dispositivos de seguridad y el generador se desconecta de la red. El retorno del agua de calefacción enfría el generador, que alcanza un rendimiento eléctrico del 91% con una temperatura máxima de retorno de 70°C.

La fuente de alimentación para arranque se compone de un transformador con rectificador y un arranque de 12 V. Actúa en el volante del cigüeñal e inicia así el funcionamiento del equipo.

Por defecto, la temperatura del gas de escape en la salida del equipo es de unos 150 °C. Por regla general, los gases de escape se evacúan sin presión de acuerdo a las instrucciones de montaje con material de instalación especial a través de una chimenea o una conducción de salida de gases.

Con un segundo intercambiador térmico colocado externamente puede obtenerse un beneficio térmico adicional y utilizarse una parte del calor de condensación del gas de escape. Con una temperatura de retorno de la calefacción de, por ejemplo, 35 °C, se alcanza una temperatura de los gases de escape de aproximadamente 55 °C después de pasar por el intercambiador térmico adicional. De este modo, puede alcanzarse un grado de condensación de un 50 % equiparable a las calderas de condensación. Así, es posible incrementar el rendimiento total, con respecto al valor calorífico inferior del combustible, del 88 a más del 100 %, siempre referido sobre el PCI del combustible.

Pero incluso con una temperatura de retorno de la calefacción mayor (máximo 70 °C) y, por consiguiente, un grado de condensación muy bajo puede ser adecuado utilizar un intercambiador térmico para gases de escape. La reducción de la temperatura de los gases de escape permite emplear una conducción de salida de gases más económica y fácil en cuanto a su instalación.

Tabla 1. Beneficio térmico logrado con el condensador Dachs (BAXIROCA).

<i>Temperatura de retorno</i>	<i>20 °C</i>	<i>35 °C</i>	<i>50 °C</i>	<i>60 °C</i>
Temp. de gases de escape aprox.	40 °C	55 °C	75 °C	85 °C
Nivel de condensación aprox.	80 %	50 %	5 %	0 %
Beneficio térmico aprox.	3,0 kW	2,3 kW	0,9 kW	0,8 kW

Es necesario utilizar junto con el equipo de microgeneración un depósito acumulador para almacenar la energía térmica extraída del equipo, y poder verterla a la instalación en las demandas punta. De esta forma, se logra incrementar el número de horas que funciona el equipo, con el consiguiente aumento en la rentabilidad de la inversión realizada, y también se asegura que el equipo funcione como mínimo una hora por cada arranque que realice, alargando así su vida útil. Es importante que este depósito tenga una estratificación óptima de la temperatura del agua en su interior.

Para llevar el agua hasta el acumulador, es necesario instalar una bomba, siempre y cuando la bomba interna del equipo no sea capaz de vencer la pérdida de carga prevista en el circuito. Si se emplease una bomba de calefacción estándar sin regulación de temperatura y caudales, no sería posible obtener una estratificación adecuada en el acumulador.

En cambio, una bomba termostática sí realiza esta tarea. Un termostato integrado en la entrada de la bomba regula la temperatura de impulsión hacia el acumulador intermedio a unos 70-80 °C. La bomba de calefacción regulada electrónicamente se adapta al caudal requerido a través de la regulación de la presión diferencial y, de este modo, ahorra costes de electricidad en el modo de carga parcial.

Con la bomba termostática se regula constantemente la temperatura de impulsión y se adapta automáticamente el caudal.

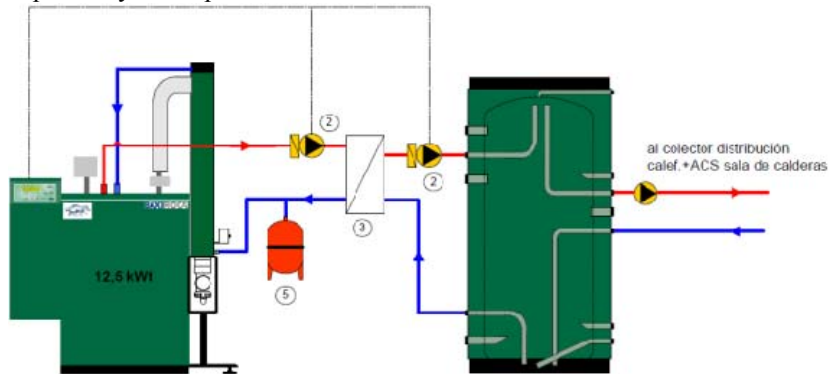


Figura 4. Esquema de principio de una instalación de microgeneración con un Dachs (BAXIROCA).

3 Equipos de microgeneración. Caso práctico: Hotel Balneario A Quinta da Auga

3.1 Descripción

El hotel-balneario está a pocos kilómetros de Santiago de Compostela. El edificio ha sido levantado utilizando como esqueleto la antigua fábrica de papel de Brandía (1792). El Hotel, de cuatro estrellas, cuenta con 59 habitaciones, y está cimentado sobre un conjunto fabril con solera y enclavado cerca de la ribera del río Sar.



Figuras 5 y 6. Vista exterior del hotel-balneario.

En este proyecto y debido a las características arquitectónicas del edificio del s. XVIII, había dificultades para emplazar la superficie solar exigida por el CTE - HE4.

La solución presentada por la ingeniería en virtud del mismo CTE, fue la sustitución parcial de la cobertura solar térmica mediante equipos de microgeneración, de tal manera que la aportación energética exigida por CTE quedó de la siguiente manera:

Tabla 2. Aportación energética exigida por CTE.

<i>Sistema</i>	<i>Energía aportada</i>	<i>Solución CTE HE4</i>
Original	80.000 kWh/año	50 colectores planos 2,4 m ²
Proyectado	60.000 kWh/año	1 equipo de microgeneración
	20.000 kWh/año	15 colectores planos 2,4 m ²

El diseño del nuevo sistema se basó en emplazar la microgeneración apoyando las calderas del sistema. Una unidad de microgeneración Dachs G5.5, de 14,5 kW térmicos y 5,5 kW eléctricos, aporta 60.000 kWh/año con un ritmo de trabajo teórico de 4.200 horas. El equipo, dimensionado para cubrir una parte de la demanda térmica para ACS y calentamiento de piscinas, una vez instalado trabajará para apoyar tanto a la producción total de ACS, como a la generación térmica de calefacción permitiendo cargas de trabajo superiores a 7.000 horas anuales. La propiedad, ante el sucesivo aumento de los precios eléctricos, decidió instalar una segunda unidad para obtener unos costes de explotación más reducidos al generar la electricidad a bajo coste.

Las unidades de microgeneración generan electricidad en el propio punto de consumo y están conectadas para el autoconsumo, es decir, la energía eléctrica generada se consumirá en la propia instalación, reduciendo así la factura eléctrica del Hotel.



Figuras 7. Detalle de un módulo de microcogeneración Dachs (BAXIROCA).

3.2 Equipos principales

2 unidades Dachs G5.5 de BAXIROCA, alimentados a gas natural con una potencia térmica entregada de 14,5 kW c/u (con condensación).

El consumo de gas natural de cada equipo es de 20,5 kW. Las prestaciones térmicas individuales son de 14,5 kW, y las eléctricas de 5,5 kW.

Se prevé un funcionamiento de unas 7.000 horas/unidad, con lo cuál permitirá el aporte anual de unos 203.000 kWh térmicos y de 77.000 kWh eléctricos.

La demanda térmica total de la instalación es de 1.654.799 kWh anuales, repartidos en calefacción, ACS y calentamiento de piscina.

Costes de explotación sin microcogeneración - sin solar				
	<i>kWh</i>		<i>Rend.</i>	<i>Consumo</i>
Energía entregada total sistema	266.000	100%	92%	289.130 kWh
Energía aportada calderas	266.000	100%	92%	289.130 kWh
			€/kWh	
Gas consumido por calderas	289.130		0,0392	11.333,91 €
Costes de explotación sin microcogeneración - con solar (50)				
	<i>kWh</i>		<i>Rend.</i>	<i>Consumo</i>
Energía entregada total sistema	266.000	100%	132%	202.174 kWh
Energía aportada Solar	80.000	30%		kWh
Energía aportada calderas	186.000	70%	92%	202.174 kWh
			€/kWh	
Gas consumido por Solar	0		0,0000	0,00 €
Gas consumido por calderas	202.174		0,0392	7.925,22 €
Consumo de gas total				7.925,22 €
Costes mantenimiento solar				1.500,00 €
Total costes explotación				9.425,22 €
Reducción costes explotación				-16,8%
Costes de explotación con microcogeneración - con solar (15)				
	<i>kWh</i>		<i>Rend.</i>	<i>Consumo</i>
Energía entregada total sistema	266.000	100%	81%	329.391 kWh
Energía aportada Dachs	203.000	76%	70,7%	287.000 kWh
Energía aportada Solar	24.000	9%		0 kWh
Energía aportada calderas	39.000	15%	92%	42.391 kWh
			€/kWh	
Gas consumido por el Dachs	287.000		0,0392	11.250,40 €
Gas consumido por Solar	0		0,0000	0,00 €
Gas consumido por calderas	42.391		0,0392	1.661,74 €
Consumo de gas total (teórico)				12.912,14 €
Energía el. producida por el Dachs	77.000 kWh		0,1130	-8.701,00 €
Costes mantenimiento Solar+Dachs				2.040,00 €
Total costes explotación				6.251,14 €
Reducción costes explotación				-44,8%

Figura 8. Comparativa costes de explotación (precios de combustibles correspondiente a 2009).



Figura 9. Detalle de los equipos.

La conexión es a baja tensión en 3/400V/50Hz, conectado directamente a red al generar mediante alternador asíncrono.

La inversión en la instalación de microgeneración ha sido inferior a 50.000 euros.

3.3 Beneficios

Reducción del consumo de explotación para la producción de ACS de hasta el 44% comparado con una solución basada únicamente en calderas.

Mantenimiento de las cubiertas originales del edificio al tratarse de una solución que disminuye la cobertura solar según CTE HE4.

Reducción de emisiones de CO₂ de hasta un 73%, al generar localmente la energía eléctrica, comparado con una solución basada únicamente en calderas.

4 Conclusiones

A la vista de todo lo expuesto, el uso de equipos eficientes como los de microgeneración tendrá un papel muy importante en los sistemas de calefacción y ACS en los próximos años.

El principal valor añadido aportado por la microgeneración es el hecho de generar electricidad a la vez que cubre las necesidades de ACS y calefacción.

Mediante el uso de estos equipos altamente eficientes, los arquitectos e ingenieros pueden beneficiarse al obtener una mejor certificación energética del edificio; los instaladores se aprovechan de la facilidad de montaje e integración de dichos equipos mientras que los propietarios ven reducida de forma considerable su factura energética.

Pilas de combustible

Milagros Rey Porto

Gas Natural Fenosa

1 Introducción

En la actualidad se advierte la necesidad de encontrar un escenario energético distinto al existente en el mundo desarrollado occidental. Hay una conciencia general que reclama un uso sostenible de los recursos compatible con el estado de bienestar. Esta necesidad de cambio no conduce de modo determinista a una solución sino que abre posibilidades a distintos escenarios teóricos que podrán llegar a ser una realidad en función de los cambios sociales y políticos y de las tecnologías disponibles.

Los nuevos escenarios imaginables comparten unos criterios comunes tendentes a:

- reducir emisiones contaminantes o de efectos adversos en el clima,
- utilizar de manera más eficiente los recursos fósiles,
- incrementar la presencia de recursos renovables,
- evitar la concentración en una misma área geográfica
- aumentar la independencia energética

En la definición de los distintos escenarios que pueden configurarse el hidrógeno puede llegar a jugar un papel importante como portador de energía y como medio para almacenarla. El hidrógeno debe ser considerado como un “portador de energía” de modo análogo a la electricidad: ambos se obtienen de una fuente de energía primaria y son limpios en el punto de consumo.

El hidrógeno puede utilizarse como un combustible alternativo a los combustibles fósiles en aplicaciones convencionales con la introducción de algunos ajustes (quemadores, motores de explosión) o de modo más eficiente mediante una oxidación electroquímica en las pilas de combustible. Estos

dispositivos convierten directamente la energía contenida en el hidrógeno en energía eléctrica sin necesidad de recurrir a un ciclo termodinámico intermedio con el que producir energía mecánica; con ello se libera la limitación de eficiencia que impone el máximo teórico del ciclo de Carnot.

2 Generalidades. Propiedades del hidrógeno.

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica. En condiciones normales es un gas incoloro, inodoro e insípido, compuesto de moléculas diatómicas, H₂. El átomo de hidrógeno, símbolo H, consta de un núcleo de unidad de carga positiva y un solo electrón. Tiene número atómico 1 y peso atómico de 1.00797. Es constituyente del agua y de toda la materia orgánica, y está distribuido de manera amplia no sólo en la Tierra sino en todo el universo.

El hidrógeno puede ser caracterizado como un gas industrial que se produce y consume en grandes cantidades en plantas químicas y refinerías. Las aplicaciones actuales de hidrógeno incluyen la producción de amoníaco para fertilizantes, producción de metanol, producción en las refinerías de petróleo, la hidrogenación, la producción de metales, fabricación de sistemas electrónicos y el enfriamiento de los generadores térmicos. De estos, sin embargo, la producción de amoníaco, metanol, y su consumo en refinerías, representan las mayores aplicaciones.

La producción mundial de hidrógeno es de 5×10^{11} Nm³/año, sólo como producto industrial. Si este hidrógeno tuviera presencia en el mercado energético, su contribución sería de 6.5 10¹⁸ J, equivalente al 1,5% del consumo mundial de energía. Este hidrógeno es producido en un 96% a partir de hidrocarburos.

El gas natural es la materia prima más utilizada para la obtención de hidrógeno por sus abundantes reservas, su amplia red de gasoductos de transporte y distribución y porque su principal constituyente, el metano, es el hidrocarburo con mayor proporción de hidrógeno en su molécula.

El hidrógeno ha sido siempre valorizado por sus propiedades químicas como reactivo por lo que parámetros tan importantes desde el punto de vista energético, como pueda ser su poder calorífico, han tenido poca consideración.

Sin embargo se plantean escenarios futuros diferentes a la situación actual, basados en una economía del hidrógeno con una aplicación amplia a nivel minorista, tanto como combustible en el transporte como en los sectores residencial y terciario en cogeneraciones.

Todos los estudios desarrollados hasta el momento identifican la movilidad como una prometedora oportunidad de mercado. El hidrógeno es considerado como uno de los vectores de energía primaria del sector transporte en el futuro. Esto se debe a que es un combustible limpio y a la elevada eficiencia de las pilas de combustible, que mejorarían el balance energético del sector transporte, aunque el hidrógeno empleado se produjese a partir de gas natural (Stolzenburg et al., 2004).

En una perspectiva a largo plazo los trabajos sobre el hidrógeno lo contemplan como un portador de energía de procedencia renovable. Además,

según algunas fuentes, su generación y transporte podrían ser más económicos que los de la electricidad equivalente si se produce en grandes cantidades (incluso si se considera un incremento de coste de un 20~30% por separación y confinamiento de CO₂ en el punto de producción del hidrógeno cuando se parte de hidrocarburos). El método de producción de hidrógeno a gran escala más económico es el reformado de gas natural, pero si se tiene en consideración la captura del CO₂ generado, es más eficiente su generación empleando energías renovables mediante electrolisis (Bharadwai et al., 2003).

En la actualidad se está produciendo un incipiente desarrollo del estudio de este tipo de sistemas.

En la tabla 1 se resumen las propiedades energéticas del hidrógeno, comparadas con las de otros combustibles.

Tabla 1. Propiedades energéticas del hidrógeno y otros combustibles.

	<i>Hidrógeno</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Propano</i>	<i>Metano</i>
Poder calorífico inferior (kJ/g)	120	43	46	50
Densidad gas (kg/Nm ³)	0,090	-	2,010	0,7171
Densidad energética gas (MJ/Nm ³)	10,8	-	92,5	35,8
Densidad líquido (kg/l)	0,071	0,733	-	-
Densidad energética liq. (MJ/l)	10,8	31,5	-	-
Límites de inflamabilidad (%)	4,0-75	1,0-7,6	2,1-9,5	5,3-15,0
Límites de detonación (%)	18,3-59	1,1-3,3	1,1-3,3	6,3-13,5
Mínima energía de activación (mJ)	0,02	0,24	0,26	0,29
Temp. de comb. espontánea (K)	858	501-744	760	813
Emisiones CO ₂ /kJ (mg)	0	» 80	65	55
Visibilidad de la llama	no	sí	sí	sí
Toxicidad (combustible y emisiones)	no/no	sí/sí	sí/sí	sí/sí

Cabe destacar que el hidrógeno es un combustible con un gran poder calorífico (es decir que un gramo de hidrógeno libera más del doble de energía que un gramo de otros combustibles), aunque debido a su baja densidad, un metro cúbico de hidrógeno gas libera mucha menos energía que otros combustibles gaseosos, y si se licua el hidrógeno, un litro sólo almacena un tercio de la energía que tiene un litro de gasolina o gasóleo.

Entre las ventajas del hidrógeno se puede añadir que no produce emisiones de CO₂ en el punto de consumo, no es tóxico y es muy volátil, lo que es muy seguro en espacios abiertos.

Entre sus inconvenientes, además de su baja densidad energética por unidad de volumen, se debe mencionar su baja energía de activación y su alta fugacidad que lo convierten en un combustible con el que hay que tener especiales medidas de seguridad en espacios cerrados.

3 Pilas de combustible

Actualmente el mayor volumen de generación eléctrica se produce en alternadores accionados por energía mecánica, ya sea ésta proporcionada por el movimiento de una turbina de gas, de vapor o hidráulica, un motor o un molino eólico. En mucha menor medida se genera electricidad a partir de procesos químicos en acumuladores y pilas.

A la familia de dispositivos que generan potencia eléctrica mediante una reacción química, se ha añadido recientemente la pila de combustible. Ésta es un dispositivo que, a diferencia del acumulador eléctrico, no es reversible ⁽⁷⁾ y, a diferencia de la pila seca, no se agota: tiene una alimentación continua de reactivos de modo que el proceso genera electricidad mientras se proporciona esta alimentación. Utiliza la oxidación del hidrógeno para producir agua como producto de reacción ⁽⁸⁾.

La teoría termodinámica del ciclo de Carnot muestra que, incluso bajo condiciones ideales, un motor térmico no se puede convertir toda la energía térmica suministrada en energía mecánica, alguna energía térmica se pierde. En un motor de combustión interna, el motor acepta el calor de una fuente a alta temperatura (T₁), convierte una parte de la energía en trabajo mecánico y se pierde el resto del calor a baja temperatura (T₂). Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre fuente y sumidero, mayor será la eficiencia

$$\text{Eficiencia máxima} = (T_1 - T_2) / T_1$$

Debido a que las pilas de combustible convierten la energía química directamente en energía eléctrica, este proceso no implica la conversión del calor en energía mecánica.

Por lo tanto, la eficiencia de celdas de combustible puede superar el límite de Carnot, incluso cuando que operan a temperaturas relativamente bajas.

Las pilas de combustible constituyen el paso final en una economía del hidrógeno en la que la energía química del hidrógeno se transforma en energía eléctrica. Las pilas de combustible son especialmente adecuados para este tarea debido a que operan con alta eficiencia, no contaminan, y proporcionan energía eléctrica en una amplia variedad de aplicaciones -

⁽⁷⁾ Algunos desarrollos recientes versan sobre pilas de combustible reversibles que pueden generar electricidad a partir de hidrógeno y oxígeno, o actuar como electrolizadores

⁽⁸⁾ Existen desarrollos de celdas capaces de admitir directamente metanol (DMFC)

desde grandes plantas de energía estacionarias como en transporte o dispositivos móviles y portátiles. La reacción inversa se produce en los electrolizadores. Estas dos tecnologías - las celdas de electrólisis y de combustible - se emplearían en la economía del hidrógeno como un medio limpio y sostenible de la producción y uso de energía.

Entre las ventajas generales de las pilas de combustible, cabe destacar:

- Su buen rendimiento, en torno al 40 o 50% con posibilidad de mejora.
- Este rendimiento, a diferencia de otros sistemas, es relativamente alto para distintas potencias en un mismo sistema (es decir funcionando tanto a plena potencia como a cargas parciales), lo que permite ajustar la producción a la demanda sin sacrificar la eficiencia.
- Asimismo, el rendimiento es bueno independientemente del tamaño del sistema (a diferencia de los sistemas térmicos que para conseguir buenos rendimientos hay que ir a escalas grandes).
- Son sistemas con muy poca inercia, que pueden seguir casi al instante la curva de demanda.
- Tienen un carácter modular, lo que significa por un lado un aumento de la fiabilidad a la vez que una reducción de costes, por otro lado que las plantas se pueden construir en poco tiempo y que pueden aumentar o disminuir la potencia sin cambiar su diseño, y por último que se puede conseguir una muy alta disponibilidad ya que la parada de un módulo no supone la parada del sistema completo.
- Al carecer de partes móviles, las pilas de combustible son silenciosas, no producen vibraciones (estas afirmaciones no son válidas para algunos de los componentes auxiliares), y por ello en teoría requieren poco mantenimiento.

Fundamentalmente una pila de combustible es un apilamiento (con conexiones internas en serie) de células o celdas individuales. Estas celdas están formadas por dos electrodos (ánodo y cátodo) donde se producen respectivamente la oxidación del hidrógeno y la reducción del oxígeno, y por un electrolito (que puede ser un medio tanto ácido como básico) que permite el intercambio de los iones que permiten ambas reacciones. La placa bipolar es el elemento de unión que facilita la canalización de los gases y permite la circulación de los electrones, que pasando por el circuito externo, completan las reacciones.

En una celda de hidrógeno éste se disocia en el cátodo, sobre un catalizador, en iones positivos (protones) y electrones (cargas negativas). Los electrones pasan al ánodo a través de un circuito eléctrico exterior. Los protones pasan a través del electrolito hasta el cátodo, donde se combinan con oxígeno y los electrones para producir agua.

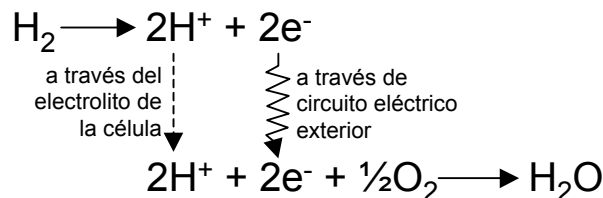


Figura 1. Disociación del hidrógeno en el cátodo.

El que se ha descrito es el proceso más simple en una celda de combustible (correspondiente a las de tipo PEM que se describirán); sin embargo hay distintas tecnologías de pilas de combustible que se distinguen por el electrolito que utilizan y que se enuncian a continuación (empezando por las que trabajan a menor temperatura hasta las que lo hacen a temperaturas del orden de los 1000 °C).

- • Pilas de combustible alcalinas (AFC, Alkaline Fuel Cells).
- • Pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM, Proton Exchange Membrane, también denominadas pilas de polímeros sólidos, SPFC, Solid Polimer Fuel Cells).
- • Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cells).
- • Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC, Molten Carbonates Fuel Cells)
- • Pilas de combustible de óxidos sólidos (SOFC, Solid Oxides Fuel Cells).

El esquema de la figura 2 muestra los niveles de temperatura y flujos de iones que se desplazan en las distintas tecnologías de celdas de combustible.

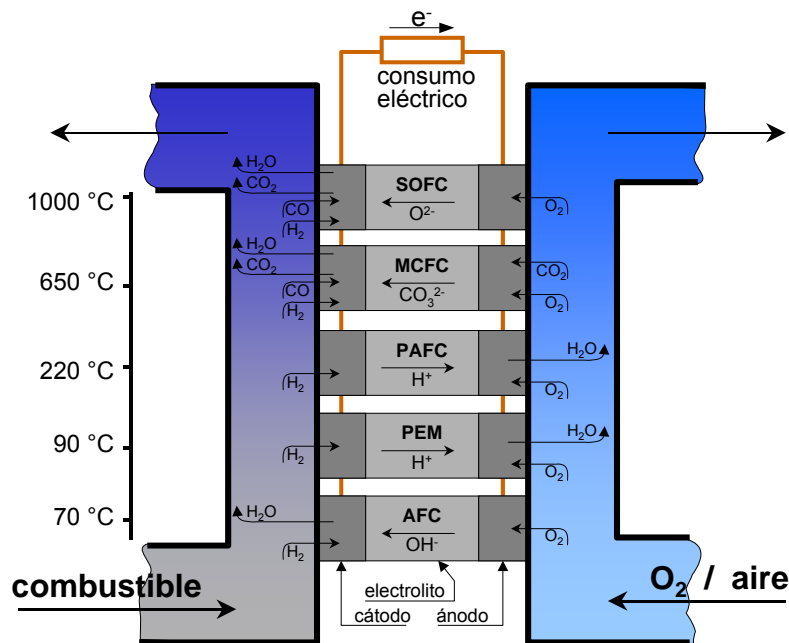


Figura 2. Esquema de las distintas tecnologías de pilas de combustible.

En este esquema no se han representado las pilas de metanol directo (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC).

A continuación se describen con mayor detalle cada una de estas tecnologías indicándose sus aplicaciones, mayores ventajas y desventajas.

Tabla 2. Descripción de las tecnologías de pilas de combustible.

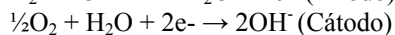
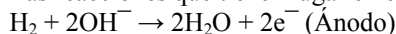
Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	System Output	Efficiency Electrical	Applications	Advantages	Disadvantages
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)*	Solid organic polymer poly-perfluorosulfonic acid	50 - 100°C 122 - 212°F	<1kW – 250kW	53-58% (transportation) 25-35% (stationary)	<ul style="list-style-type: none"> Backup power Portable power Small distributed generation Transportation 	<ul style="list-style-type: none"> Solid electrolyte reduces corrosion & electrolyte management problems Low temperature Quick start-up 	<ul style="list-style-type: none"> Requires expensive catalysts High sensitivity to fuel impurities Low temperature waste heat Waste heat temperature not suitable for combined heat and power (CHP)
Alkaline (AFC)	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	90 - 100°C 194 - 212°F	10kW – 100kW	60%	<ul style="list-style-type: none"> Military Space 	<ul style="list-style-type: none"> Cathode reaction faster in alkaline electrolyte, higher performance 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive removal of CO₂ from fuel and air streams required (CO₂ degrades the electrolyte)
Phosphoric Acid (PAFC)	Liquid phosphoric acid soaked in a matrix	150 - 200°C 302 - 392°F	50kW – 1MW (250kW module typical)	32-38%	<ul style="list-style-type: none"> Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> Higher overall efficiency with CHP Increased tolerance to impurities in hydrogen 	<ul style="list-style-type: none"> Requires expensive platinum catalysts Low current and power Large size/weight
Molten Carbonate (MCFC)	Liquid solution of lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a matrix	600 - 700°C 1112 - 1292°F	<1kW – 1MW (250kW module typical)	45-47%	<ul style="list-style-type: none"> Electric utility Large distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Can use a variety of catalysts Suitable for CHP 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature speeds corrosion and breakdown of cell components Complex electrolyte management Slow start-up
Solid Oxide (SOFC)	Solid zirconium oxide to which a small amount of Ytria is added	650 - 1000°C 1202 - 1832°F	5kW – 3MW	35-43%	<ul style="list-style-type: none"> Auxiliary power Electric utility Large distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Can use a variety of catalysts Solid electrolyte reduces electrolyte management problems Suitable for CHP Hybrid/GT cycle 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature enhances corrosion and breakdown of cell components Slow start-up Brittleness of ceramic electrolyte with thermal cycling

3.1 Pilas de combustible alcalinas (AFC)

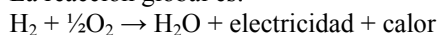
Son las que trabajan a menor temperatura, alrededor de 70~80 °C, y las primeras que encontraron una aplicación fuera del laboratorio al ser adoptadas por los programas espaciales de USA y URSS en los años 60s y 70s.

Estas pilas de combustible utilizan una solución de KOH en agua como electrolito y pueden usar una gran variedad de metales no preciosos como catalizadores en el ánodo y el cátodo. En este tipo de pilas, es el ion hidroxilo, con una carga negativa, y no un protón el que atraviesa el electrolito. Las pilas AFC de altas temperaturas pueden funcionar entre 100°C y 250°C. No obstante, diseños más modernos funcionan a temperaturas más bajas, entre 23°C y 70°C aproximadamente. Son muy eficientes, alcanzando un 60% rendimiento en aplicaciones espaciales.

Las reacciones que tienen lugar en el ánodo y cátodo son:



La reacción global es:



La cinética de la reducción de O₂ en los electrolitos alcalinos es más favorable que en el ácido fosfórico. Considerando un cátodo de Pt (0,25 mg/cm²) en 30% de KOH a 70 ° C y en ácido fosfórico al 96% a 165 ° C, los potenciales catódicos (vs. electrodo reversible de hidrógeno) a 100 mA/cm² en estos dos electrolitos son 0,868 y 0,730 V, respectivamente. Varias explicaciones han sido propuestas para justificar las mayores velocidades de reducción de O₂ en los electrolitos alcalinos. La consecuencia práctica del mayor rendimiento de los cátodos de Pt en electrolitos alcalinos es que pilas de combustible alcalinas tienen mayor eficiencia que las de ácido fosfórico a una densidad de corriente dada, o una mayor densidad de potencia a la misma eficiencia.

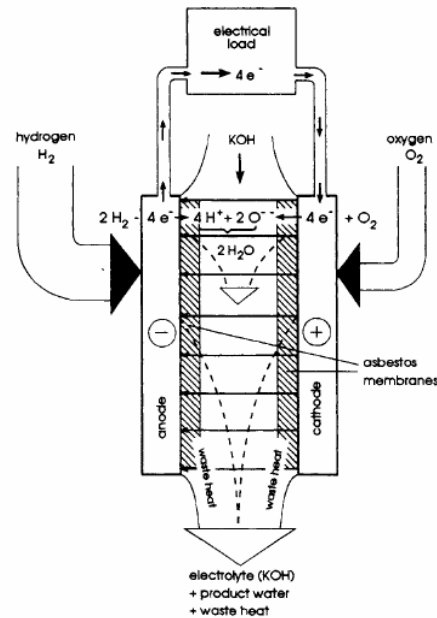


Figura 3. Representación de una AFC. Fuente: Fuel Cell Handbook.

Su desventaja reside en su sensibilidad a la contaminación por dióxido de carbono. De hecho, incluso una pequeña cantidad de CO₂ en el aire puede afectar el funcionamiento de la pila, haciendo necesario purificar tanto el hidrógeno como el oxígeno utilizados. El CO₂ reacciona con el electrolito de KOH para formar un carbonato, lo que reduce la movilidad de iones del electrolito.

Debido a las necesidades de purificar el H₂ y el O₂ de alimentación y al carácter cáustico del electrolito, esta tecnología fue rechazada inicialmente para su uso en automoción. Actualmente han encontrado aplicaciones militares y civiles en cogeneración de pequeña potencia. También un industrial las ha adaptado para uso en automoción equipando un par de taxis en Londres.

Las pilas AFC han demostrado ser suficientemente estables durante más de 8.000 horas de funcionamiento. Para ser viables desde el punto de vista económico en aplicaciones útiles a gran escala, tienen que superar las 40.000 horas. Posiblemente, éste es el obstáculo más significativo para la comercialización de esta tecnología.

3.2 Pilas de membrana de intercambio de protones (PEM)

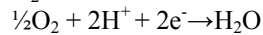
Estas pilas, en las que los portadores eléctricos que atraviesan el electrolito son los protones, trabajan a temperaturas cercanas a los 90-100°C. Este nivel de temperatura y el hecho de tener un electrolito sólido que evita vertidos en caso de accidente, las hacen adecuadas para su uso en automoción. De hecho es este sector el que está dando un mayor empuje a la tecnología de las pilas de combustible la mayoría de fabricantes de

automóviles tienen proyectos de desarrollo de pilas para alguno de sus modelos de vehículos eléctricos.

Debido a la baja temperatura de operación es necesario incluir metales nobles, tales como platino, Pt, y rutenio, Ru, en los electrodos. Como combustible anódico se utiliza hidrógeno puro o reformado y el cátodo puede operar con aire como fuente de oxígeno. A continuación, se muestran las reacciones electroquímicas de oxidación del hidrógeno y reducción del oxígeno:

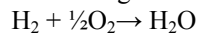


Oxidación anódica del hidrógeno



Reducción catódica del oxígeno

Reacción global:



A continuación se representa un esquema de una pila PEM:

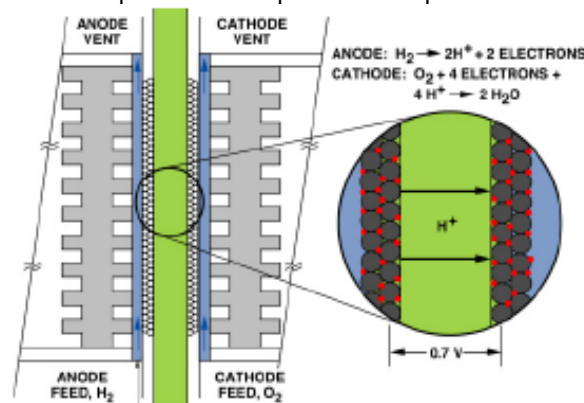


Figura 4. Esquema representativo de una PEMFC.

Las reacciones electroquímicas en una PEM son similares a los de la PAFC: el hidrógeno molecular en el ánodo se oxida para proporcionar protones, mientras que al mismo tiempo, libera dos electrones que pasan por un circuito eléctrico externo para alcanzar el cátodo. Las tensiones en cada electrodo, debido al potencial de oxidación del hidrógeno y al potencial de reducción de oxígeno, generan un gradiente de tensión de aproximadamente 1 V (depende de las condiciones). Es este potencial el que impulsa el protón a través de la membrana. A medida que el protón avanza en la membrana arrastra con él un cierto número de moléculas de agua. En el cátodo, el protón reacciona con el oxígeno para formar agua. El agua producida es transportada a través de la membrana junto con los protones. Puesto que el transporte de protones a través de la membrana depende del grado de humidificación de la misma, el control del agua es una pieza clave en el funcionamiento correcto de la PEMFC.

En la figura 5 se representan los componentes de una celda PEM:

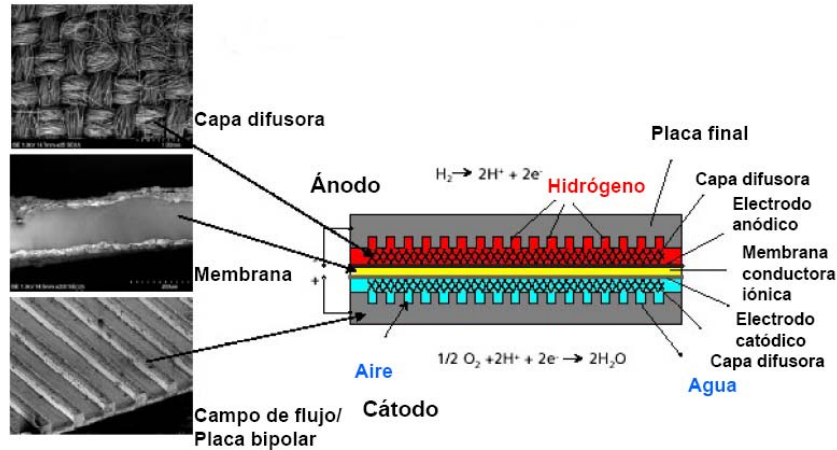


Figura 5. Estructura representativa de una celda de combustible PEM.

Los componentes de la celda son:

- Membrana de intercambio iónico:

La función de la membrana es proporcionar un medio conductor y separa los gases reactivos. Las membranas orgánicas de intercambio catiónico en las celdas de combustible fueron concebidas originalmente por William T. Grubbs en 1959. Ese esfuerzo inicial condujo al desarrollo del la polímero de ácido perfluorosulfónico utilizado en los sistemas actuales. El material es un aislante eléctrico. La conducción de iones se lleva a cabo a través de grupos iónicos dentro de la estructura del polímero. El más empleado es el Nafion® de Du Pont. También se emplean Flemion®, Raymion®.

A continuación se muestra la estructura del Nafion:

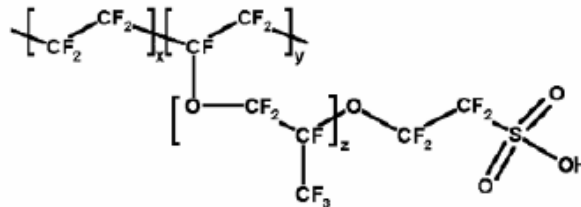


Figura 6. Estructura del NAFION.

La estructura del Nafion consiste en una fase formada por cadenas de fluorocarbono (C-F) en cada una de las cuales hay un grupo sulfónico. En estas cadenas el grupo sulfónico es fijo y permanece ligado a la cadena. Al no perder este grupo este tipo de membranas no se degrada con facilidad y tiene un largo período de funcionamiento. La conductividad se debe a estos grupos que tienen carácter hidrófilo, mientras que las cadenas fluoradas son hidrófobas.

El contenido de agua que una membrana puede alcanzar es proporcional a los sitios iónicos, mientras que las propiedades importantes de la membrana

(conductividad, permeabilidad a los gases, y las propiedades mecánicas) son dictadas por el contenido de agua (Eisman, 1987).

Los retos tecnológicos en las membranas son: aumentar la temperatura de operación, solventar los problemas de humidificación, conseguir una elevada conductividad iónica y disminuir los costes.

- Electrocatalizador.

Es el responsable de facilitar la transformación del combustible entrante (H₂) en protones y electrones en el ánodo y de la reacción del oxígeno entrante en el cátodo con protones y electrones. El material más utilizado es el platino o aleaciones del mismo, tanto para el cátodo como para el ánodo. Para promover la oxidación de hidrógeno, en el ánodo se usa un catalizador de platino metal puro o un catalizador de platino soportado, por lo general en carbón o grafito para alimentación de hidrógeno puro. Para la reducción del oxígeno en el cátodo se puede utilizar el Pt metálico o soportado.

Los retos tecnológicos en este campo se dirigen fundamentalmente a la búsqueda de catalizadores alternativos al Pt, a optimizar la dispersión del catalizador, aumento de la tolerancia a impurezas (CO) y mejorar la eficiencia.

- Capa difusora de gases

Es el medio poroso que facilita que los gases lleguen al catalizador de la manera más uniforme posible. Su función es asegurar que todo el combustible entrante es llevado al catalizador a la velocidad adecuada y sin impedimentos. Además debe permitir el paso de los electrones hacia el circuito externo, permitir la evacuación del agua formada en la reacción en el cátodo y aportar soporte mecánico. Existe una capa de difusión de gas en cada uno de los electrodos.

Para cumplir estos requisitos tienen que poseer conductividad electrónica, porosidad, hidrofobicidad y estabilidad química.

Los materiales empleados son papel de carbón o tela de carbón.

El conjunto formado por la membrana+ catalizador+ capa difusión se llama MEA. El catalizador se puede depositar en la membrana (en este caso la MEA estaría formada por la membrana catalizada y el difusor de gas) o en el difusor de gas (estando la MEA formada por la membrana y el electrodo).

- Placa Bipolar

Es el elemento que delimita la célula, se coloca una placa bipolar limitando cada electrodo. Sus funciones son varias: realiza la unión entre una célula y la siguiente (siendo, por tanto a la vez, el cátodo de una y el ánodo de la siguiente, de ahí le viene su nombre), es la zona de entrada de los diferentes gases que reaccionan en cada uno de los electrodos (para realizar esta función esta placa se mecaniza con canalizaciones internas), da salida a los productos de las reacciones y transmite al circuito externo la corriente eléctrica generada.

Para cumplir con estas funciones tiene que ser un buen conductor electrónico, impermeable a los gases de reacción, químicamente estable en atmósfera reductora y oxidante, poseer una buena resistencia mecánica, adecuada canalización de gases y líquidos, buena evacuación del calor y tiene que ser delgada y ligera para minimizar el volumen y el peso.

Se emplean los siguientes materiales: grafito no poroso; metales (como material base aluminio, acero inoxidable, níquel y titanio y como recubrimiento oro, aleaciones metálicas) o composites (base carbón con resinas termoplásticas, plástico policarbonatado, etc).

Los retos tecnológicos en las placas bipolares son aumentar la resistencia mecánica, la resistencia a la corrosión y empleo de nuevos materiales.

Las principales ventajas de las PEM son la baja temperatura de operación, rápida puesta en marcha, elevada densidad de potencia y simplicidad del sistema. La eficiencia de transformación eléctrica de las pilas PEM está alrededor del 45% y muestran un comportamiento muy plano a partir del 50% de su capacidad nominal. Sin embargo, exhiben una vida útil relativamente corta que, si bien es aceptable en programas de demostración en automoción, no las hacen tan adecuadas para la generación estacionaria en continuo.

Existen diferentes fenómenos que afectan a la durabilidad de las PEMFC y limitan su vida útil, tales como el control del agua producida en la celda, la degradación de la membrana, la corrosión del carbón, la disolución/aglomeración del electrocatalizador, el impacto de los contaminantes, etc. En este sentido, una manera de mejorar la durabilidad es mantener las propiedades del electrocatalizador a lo largo de toda la vida útil de la pila. Actualmente, los electrocatalizadores más utilizados en PEMFC son los basados en Pt soportado sobre diferentes materiales carbonosos. No obstante, las extremas condiciones de operación que se encuentran en la pila: atmósfera oxidante en el cátodo y reductora en el ánodo, un pH muy ácido, temperaturas elevadas y un alto contenido de agua, entre otras, contribuyen a su degradación (Zhang, 2009).

Las pilas PEM para su aplicación en automoción se alimentan con hidrógeno de muy elevada pureza que el vehículo lleva a bordo. Su mayor inconveniente es el elevadísimo coste del catalizador de platino, la exigencia de pureza del hidrógeno, y los muy bajos niveles de CO y CO₂ permitidos (<10 ppm).

Las PEM han encontrado también aplicaciones para generación eléctrica estacionaria en rangos que se extienden desde 1 kWe hasta 500 kWe.

A continuación se citan alguno de los proyectos más significativos dónde se emplea esta tecnología de FC en aplicaciones estacionarias:

- En Torrance (California) Toyota ha instalado PEM de 1MW de Ballard Power Systems para cogeneración en su central de ventas en EEUU; otra fue instalada en FirstEnergy Generation Corp's en su Eastlake Plant en Ohio (phx).
- Existen numerosos proyectos de PEM de 5 kW en restaurantes de comida rápida de la marca McDonald's, Starbucks, Chipotle Mexican Grill, etc.
- En Japón Panasonic instaló 2000 unidades en viviendas para cogeneración.

El mercado de las aplicaciones de back-up es cada vez más extenso:

- Empresas como Sprint, AT&T, y PG&E han instalado más de 50 PEM con función de back-up en antenas de telefonía móvil en EEUU, una

base militar en Carolina del Sur instaló 10 sistemas. T-Mobile instaló 35 en la Florida, y Motorola ha desplegado más de 100 en Dinamarca.

- Los países en vía de desarrollo emplean cada vez más las FC como back-up: Wireless TT Info Services en India instaló 200 FCs de Plug Power. IdaTech siguió concentrándose en Indonesia, recibiendo un pedido de 154 ElectraGen™ sumándose a los más de 100 sistemas de pila de combustible de IdaTech ya está instalado en toda Indonesia en aplicaciones de telecomunicaciones (idatech).

- EnerSys® ha instalado 300 kW en el sur de California, como sistema back-up en servicios de telefonía digital, Internet y video (phx).

Respecto al transporte existen dos grandes aplicaciones:

- Transporte de materiales:

La manipulación de materiales es un mercado muy fuerte. En 2010 se produjo un aumento de los volúmenes de ventas, reducción de costos y un sólido historial de funcionamiento exitoso.

Tabla 3. Ventas de FCs para aplicaciones de transporte de materiales en 2010. Fuente: 2010 Fuel Cell Technologies Market Report. DOE-June 2011.

Customer	# of Units	Type	Location of Deployment
GENCO Supply Chain Solutions	25	Lift Truck	Kimberly-Clark distribution center, Graniteville, South Carolina
Sysco	100	Pallet and Fork Trucks	Front Royal, Virginia distribution center
Walmart Canada	80+	Lift Trucks	Walmart sustainable refrigerated distribution center in Alberta, Canada
BMW	86	Forklifts, Tuggers, Stackers	Spartanburg, South Carolina manufacturing plant, installing six Linde hydrogen dispensers that will use the hydrogen by-product of a sodium chlorate plant that is purified, compressed and liquefied by using electricity produced from renewable hydropower
United Natural Foods Inc.	29 new, 36 retrofits	Lift Trucks	Sarasota, Florida distribution center

- Utilitarios: Las compañías automovilísticas se han involucrado en el desarrollo de utilitarios equipados con PEM (Fuel Cell Vehicles):

- o Audi: En 2004 el A2 un híbrido con un PEM de 66 kW de Ballard; en 2010 el Q5 HFC un híbrido con una PEM de 98 kW.

- o BMW: en 2000 y 2009 introdujo dos modelos híbridos con pila PEM de UTC Power de 5 kW, para alimentación de sistemas auxiliares, el primero de gasolina y el segundo con batería.

- o Daimler desde 1994 ha desarrollado 17 modelos diferentes todos ellos con pilas PEM. Los últimos híbridos con baterías, el Mercedes Benz F 800 y el B-Class F-Cell con una PEM de 90 kW.

- o Fiat ha desarrollado en 2007 el Panda con una PEM de 60 kW.

- o Ford desde 1999 ha introducido 6 modelos todos ellos con PEM de Ballard.

- o GM desde 1997 ha fabricado 14 modelos, el último en 2008. Es el Provoq, un modelo híbrido con batería con una PEM de 93 kW de la propia marca.

- o Honda desde 1999 ha desarrollado 10 modelos con tecnologías híbridas con baterías, ultracondensadores y pila de combustible como único sistema de propulsión. El último, mostrado en 2008, es el modelo FC Sport Concept con una PEM desarrollada por Honda.

- o Hyundai desde 2000 ha fabricado 7 modelos de vehículo híbrido con baterías o supercondensadores. El último modelo se llama Blue2, mostrado en 2011 y está equipado con un sistema híbrido de batería y PEM de 90 kW.

- o Toyota desde 1996 ha desarrollado 9 vehículos de PEM todos ellos híbridos con batería. Las pilas son desarrolladas por ellos mismos.

- o VW desde 1999 ha desarrollado 7 modelos con tecnologías diferentes, 6 basados en PEM. También son fabricantes de FC.

También han hecho desarrollos otras compañías como Kia, Mazda o Suzuki, y en menor medida Volvo, Mitsubishi, PSA Peugeot Citroën, Renault, Nissan, etc.

3.3 Pilas de ácido fosfórico (PAFC)

Su electrolito es ácido fosfórico a una temperatura 150- 220 °C. A menores temperaturas el ácido fosfórico es un mal conductor y la contaminación del Pt del ánodo por CO es importante. El uso de ácido concentrado al 100% minimiza la presión de vapor del agua, por lo tanto la gestión del agua en la celda no es un problema. La matriz empleada para retener al ácido es carburo de silicio y el catalizador empleado en ánodo y cátodo es el Pt.

Las reacciones que tienen lugar en el ánodo y cátodo son:

$2 \text{H}_2 \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$: Oxidación del hidrógeno en el ánodo

$\text{O}_2 + 4 \text{H} + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$: Reducción del oxígeno en el cátodo

La reacción global es: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Fueron las primeras en ofrecer unidades comerciales en rangos de 100 a 250 kW de potencia eléctrica y con capacidad para adaptarse a cogeneración debido a su nivel térmico.

Presentan un buen comportamiento a cargas parciales pero su envejecimiento es temprano, con prestaciones que decrecen linealmente con el tiempo.

Son la tecnología de pila de combustible más madura, con más de 200 unidades instaladas y operando actualmente los bancos, hoteles, hospitales y estaciones de policía. Esta tecnología tiene la ventaja de que es más tolerante a las impurezas, en particular los hidrocarburos reformados. Tienen una eficiencia eléctrica de entre un 37% y 42% que se eleva al 85% con cogeneración.

Algún prototipo de autobús las incorporó para alimentar el motor eléctrico de propulsión (Univ. de Georgetown). Actualmente esta tecnología parece rechazada por el sector de la automoción.

Un equipo de 200 kWe de UTC Power se encuentra plenamente comercializado como grupo de cogeneración compacto alimentado con gas

natural o GLP (el package incluye el reformador para la generación de hidrógeno) y desde 2009 se comercializa una unidad de 400 kWe.

Mediante esta tecnología se ha extendido la aplicación de las pilas de combustible para cogeneración pero se han visto superadas por mejores y más actuales tecnologías. La misma UTC Power ha abierto líneas de desarrollo de pilas PEM y SOFC.

Como proyectos significativos de pilas PAFC se pueden citar los siguientes:

- UTC Power ha instalado más de 300 unidades de PAFC para aplicaciones de cogeneración fundamentalmente. Los ejemplos más significativos serían: Toshiba en Houston con 65.615 horas de funcionamiento; en un casino en Uncasville (EEUU) con 58.307 horas de funcionamiento; en la central de policía del Central Park en Nueva York con 62.165 horas; en el hospital de Bocholt (Alemania) con 59.456 horas de funcionamiento; un district heating en Halle (Alemania) con 56.630 horas de funcionamiento; en Huis Ten Bosch Sasebo en Japón con 54.694 horas de funcionamiento (utcpower). También ha instalado una unidad de 400 kWe en S.Diego en un supermercado Albertsons en 2010 y en 2008 800 kWe en East Hartford en una tienda de deportes (Cabela's). La marca de supermercados Whole Foods Market ha instalado tres unidades de 400 kWe en EEUU.

- En la Air Force Base de los Ángeles Logan Energy Ltd opera una PAFC de 5 kW de Plug Power GenSys que proporciona energía eléctrica y térmica (Fuel Cell Markets).

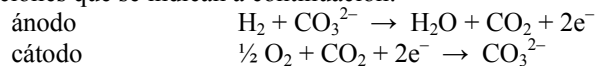
- En el parque de servicio de un edificio de la administración del valle de Yosemite, CA se instaló una PAFC de 5 kW Plug GenSys 5P para cogeneración. Esta pila durante 12.963 horas de funcionamiento ha tenido una disponibilidad total del 91% y la eficiencia eléctrica del 23%. 11

- En 2010 Logan Energy Ltd instaló una PAFC de 200kWe en el edificio de TfL Palestra en Southwark, Londres.

3.4 Pilas de carbonatos fundidos (MCFC)

Su electrolito es una mezcla de carbonatos alcalinos fundidos en una matriz porosa, químicamente inerte de cerámica de óxido de aluminio y litio a temperaturas sobre los 600 °C. Debido a las altas temperaturas de operación no necesitan emplear catalizadores basados en metales nobles, lo que significa una reducción de costes.

El portador interno de cargas eléctricas es el ion carbonato según las reacciones que se indican a continuación:



En la figura 7 se representa un esquema de una pila de carbonatos fundidos:

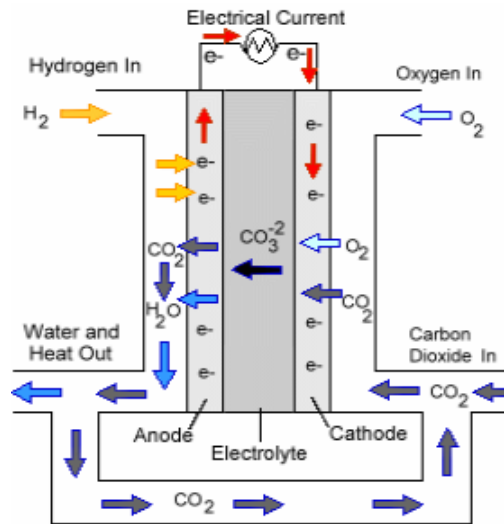


Figura 7. Representación de una AFC. Fuente: DOE.

En el interior de la pila hay una circulación de CO_2 que incorpora oxígeno del aire y un par de electrones provenientes del circuito eléctrico exterior, formándose el ion carbonato (cátodo). El ion carbonato, en forma de sales fundidas, atraviesa el soporte cerámico para reaccionar con el hidrógeno en el ánodo, generando agua y liberando el par de electrones que regresan al circuito eléctrico.

Estas pilas, por trabajar a altas temperaturas, permiten efectuar el reformado interno del gas natural, GLP o biogás con que se alimenta el sistema; además no precisan la eliminación del CO presente en el hidrógeno obtenido de hidrocarburos y abaratan los costes de los catalizadores. En estas pilas no son los protones los que circulan a través del electrolito sino los aniones carbonato; de este modo el CO proveniente del proceso de reformado para la obtención de hidrógeno deja de ser un veneno para los catalizadores para pasar a ser un combustible aprovechable.

Poseen una mayor eficiencia que las PAFC alcanzar un 50% de eficiencia, superior a la eficiencias de entre 37% -42% de las PAFC. Cuando el calor residual se captura y se utiliza, la eficiencia global puede alcanzar el 85%.

Además, debido a las altas temperaturas de operación, poseen reformadores internos para generar el hidrógeno de alimentación, lo cual reduce también los costes.

La principal desventaja de la tecnología MCFC actual es la durabilidad. Las altas temperaturas en las que estas celdas funcionan y el electrolito corrosivo utilizado aceleran la corrosión. Además estas pilas debido a las altas temperaturas de operación y a los elevados tiempos de encendido no son adecuadas para aplicaciones residenciales.

Los dos fabricantes principales Fuel Cell Energy (EEUU) and CFC Solutions (Alemania) han vendido más de 60 unidades en EEUU, Japón y Europa.

Como proyectos más significativos empleando esta tecnología se pueden identificar los siguientes:

- En King County en Renton, Washington se ha incorporado una MCFC de 1MW alimentada con biogás en una planta de tratamiento de residuos desde 2004 a 2006 (kingcounty).

- Fuel Cell Energy presenta como proyectos estrella: Gill Onions, una fábrica de alimentos en Oxnard CA se ha instalado una FC de 600 kWe alimentada directamente con biogás (Fuel Energy) ; en una panadería en Bloomfield, Connecticut han instalado dos pilas con una potencia total de 1,45MW para cogeneración ; en la cárcel de Santa Rita en el condado de Alameda, CA se ha instalado un 1 MW de FC para reducir la dependencia de la red, mejorar la fiabilidad de suministro, ya que también emplean energía solar, y gestionar los requisitos de carga punta.

- Gas Natural Fenosa tiene en su sede en Barcelona una unidad de 200 kWe de CFC Solutions para generación eléctrica y refrigeración. Los gases de la pila a 350 °C se aprovechan en una máquina de absorción de doble efecto.

3.5 Pilas de óxidos sólidos (SOFC)

Su electrolito son óxidos fundidos a temperaturas entre 950 y 1000 °C embebidos en matrices cerámicas. Como en el caso de las MCFC, es el anión, en este caso el O^{2-} , y no el protón el que atraviesa la cerámica. Las altas temperaturas de operación permiten también el reformado interno y el uso de catalizadores más baratos, además se pueden operar con hidrógeno de relativa baja pureza (contenido en CO) y también son bastante resistentes al azufre.

Existen desarrollos de estas pilas desde 1 kW hasta 2 MW de potencia eléctrica, desde la cogeneración doméstica hasta unidades de soporte a subestaciones de distribución eléctrica; los prototipos más avanzados están en el orden de los 250 kW. Presentan eficiencias eléctricas de entre el 50% - 60%, y empleando el calor residual el rendimiento puede incrementar hasta el 80% -85%.

En la figura 8 se representa un esquema de una pila SOFC.

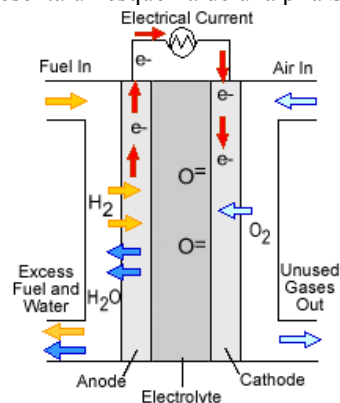


Figura 8. Representación de una SOFC. Fuente: DOE

La operación a altas temperaturas implica tiempos de arranque elevados y necesidad de aislamiento térmico, por lo tanto no son aplicables a pequeñas aplicaciones portátiles. Las altas temperaturas también implican elevadas corrosiones de materiales, por lo tanto la durabilidad de las celdas es el principal desafío tecnológico. Actualmente se están investigando SOFCs de menor temperatura. También se está investigando en diseños tubulares, que eliminan la necesidad de sellos y permite la expansión térmica.

Tradicionalmente descartadas de su uso en automoción por sus elevadas temperaturas, Volkswagen impulsó el desarrollo de tecnología con temperaturas menos elevadas para poder incorporarla a sus vehículos.

En aplicaciones estacionarias en supermercados se han instalado numerosas unidades. Por ejemplo Staples en Ontario, CA en 2008 instaló una SOFC de 300 kW para suministrar electricidad a su tienda. Wal-Mart instaló dos unidades de 400 kW en 2009 y 2010 en Lancaster, CA y en Hemet, CA.

4 Conclusiones

En la actualidad la mayor actividad de desarrollo e industrialización en el campo de las pilas de combustible se localiza en las tecnologías PEM y SOFC; son los fabricantes que han adoptado estas tecnologías los que más anuncian su próxima aparición en los mercados.

Tanto las pilas de alta temperatura MCFC y SOFC, como las PEM, van a encontrar unos espacios de mercado específicos. Las primeras se muestran adecuadas para las aplicaciones estacionarias en cogeneración sin posibilidad de entrar en el sector de la automoción donde las últimas se presentan como idóneas por su baja temperatura de trabajo.

Las PEM, por su aplicación en automoción, son objeto de operaciones de demostración en vehículos turismo y autobuses de transporte público urbano, hecho que puede favorecer la popularidad de esta tecnología e incluso crear expectativas excesivas por parte de los usuarios potenciales.

Cabe prever que el coste de las pilas de combustible se reduzca drásticamente cuando experimenten el empuje de su fabricación en serie para el mercado de automoción. Estas reducciones se deben principalmente a la reducción del contenido de metales del grupo del platino, aumento de la densidad de energía y al balance simplificado de la planta. El objetivo de coste para 2015 es de \$30/kW.

En Japón las ventas de pilas de combustible en el sector residencial superaron las 5.000 unidades en 2010, con lo que hay más de 13.000 unidades instaladas. En Korea hay más de 20 MWe de pilas de combustible (stamfordadocate).

En el sector de la automoción la venta de vehículos eléctricos con pila de combustible (FCEV) se prevé en 2015. La comercialización en Europa estaría liderada por Alemania, y en Asia, por Japón y Corea.

Referencias

Stolzenburg K., Steinberger R., Varkaraki E. et al, "Integration of Intermittent Renewable Energy Sources using Hydrogen: System

Development and Market Opportunities”, The International German Hydrogen Energy Congress 2004.

Bharadwaj R. M., Balan C., Liu Y., Sheldon K., Smith D. P., Hegyi A., Okuyama S. (2003) “Hydrogen Energy Systems: Efficiency Study”, Proceedings-Hydrogen and Fuel Cells.

K.F. Blurton and E. McMullin, Energy Conversion, 9, 141, 1969.

G.A. Eisman, Abstracts, “Fuel Cell Technology and Applications,” International Seminar, The Netherlands, p. 287, 1987.

S. Zhang, X.-Z. Yuan, J. N. C. Hin, H. Wang, K. A. Friedrich, M. Schulze, J. Power Sources 194 (2009) 588.

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=76046&p=irol-newsArticle&ID=1490021&highlight=>

http://www.idatech.com/uploadDocs/080910_IdaTech_Cascadiant.pdf

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=180086&p=irol-newsArticle&ID=1500021&highlight=>

Fuell Cell Vehhicles- Fuel Cells 2000. Updated 7/2011. <http://www.fuelcells.org/info/charts/carchart.pdf>

<http://www.utcpower.com/products/purecell400>

http://www.fuelcellmarkets.com/logan_energy_hydrogen_fuel_cell_power/news_and_information/3,1,27362,1,28000.html

<http://www.kingcounty.gov/environment/wastewater/EnergyRecovery/fuelcelldemonstration.aspx>

http://www.fuelcellenergy.com/files/gills%20onions_lowres.pdf

http://www.fuelcellenergy.com/files/FCE_PepperidgeFarm_032709%20Final.pdf

http://www.fuelcellenergy.com/files/FCE_SantaRita_120808LR.pdf

<http://www.stamfordadvocate.com/business/article/FuelCell-S-Korean-company-to-develop-smaller-852255.php>

Aprovechamiento energético de residuos agroindustriales por codigestión anaerobia

**Marta Carballa Arcos y Juan M. Lema
Rodicio**

Depto. de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Compostela

1 Residuos agroindustriales

Existe una gran cantidad de residuos procedentes de la agricultura, la actividad forestal, los diferentes tipos de industrias, o residuos generados por animales y por el hombre que llevan a la acumulación de desechos orgánicos e inorgánicos en los suelos y cauces de agua, ocasionando graves problemas ambientales, tales como la contaminación del suelo por metales pesados, las emisiones al aire de gases de efecto invernadero (GEI) y el incremento de la concentración de patógenos en las aguas subterráneas.

Entre ellos, los residuos agroindustriales son la mayor fuente de residuos y de potencial contaminante en Europa, y dentro de éstos, los residuos ganaderos constituyen el principal problema ambiental (Hobson, 1990). Además, el sector ganadero es una de las fuentes más relevantes de emisiones de metano, uno de los GEI de más impacto, cuya reducción es muy importante para cumplir con los objetivos del protocolo de Kioto.

El aumento del censo ganadero, sobre todo el porcino, la disminución de la superficie agrícola útil y el aumento de las dimensiones de las explotaciones ganaderas hace equiparable el sector ganadero con la industria en cuanto a la problemática de gestión de residuos (Danés *et al.*, 1996). Actualmente, el subsector porcino es el de mayor envergadura tanto en la UE como en España. Los dos países con mayor producción porcina de la Unión Europea son Alemania y España (EUROSTAT y MARM). La producción española representa sobre un 20% del total europeo (Figura 1).

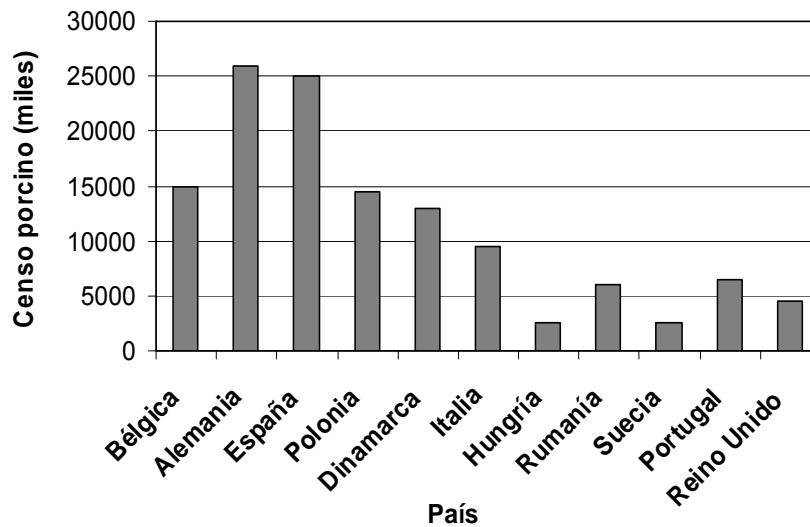


Figura 1. Censo de ganado porcino (en miles de animales) en algunos países de la UE en el año 2009 (Fuente: EUROSTAT y MARM).

El sector ganadero tiene un gran peso en la economía de Galicia, especialmente en los núcleos rurales, en los que la ganadería contribuye de forma decisiva sobre el nivel de renta de la zona, teniendo un papel fundamental en el mantenimiento de la población. En la Figura 2 se observa una subdivisión por comarcas de la producción de purín porcino en España. La producción total asciende a algo más de 23 millones de toneladas/año, de las cuales en la comunidad autónoma gallega se producen aproximadamente 330.000 ton (Proyecto Probiogás).

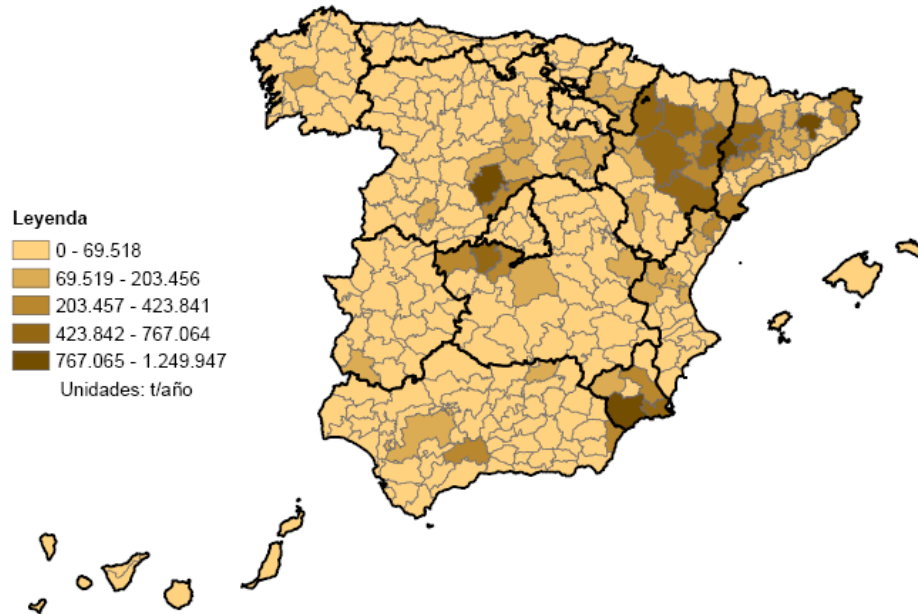


Figura 2. Purín porcino producido por comarcas (Fuente: proyecto Probiogás).

La cantidad y la calidad de los residuos producidos varía mucho dependiendo del tipo de animal, la composición de la alimentación y del sistema de gestión de la granja (estercoleros, limpieza,...). Pero, en general, las deyecciones ganaderas se caracterizan por su elevado contenido en agua y la presencia de nutrientes N, P y K cuya concentración depende directamente de la dieta del ganado.

Los residuos ganaderos se vienen aplicando directamente como fertilizantes en los campos y tierras de cultivo desde hace muchos años. Antiguamente, este hecho resultaba beneficioso pues se disponía de superficie suficiente para aplicar los purines y estiércoles sin causar problemas ambientales. En la actualidad, el aumento de la ganadería intensiva y el mayor número de cabezas por explotación ha dado lugar a una mayor fluidez y dilución de los residuos ganaderos generados aumentando por tanto su volumen. Así, en determinadas áreas, la cantidad de estos residuos es tal que supera la capacidad de aceptación del medio. Cabe resaltar que la aplicación excesiva de residuos ganaderos al suelo contribuye a la contaminación de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, por nutrientes y por organismos patógenos. También son importantes los efectos sobre la atmósfera, debido a la producción de olores y emisiones gaseosas de NH_3 , H_2S , NO_x , compuestos orgánicos volátiles, etc., procedentes de las balsas de almacenamiento.

2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual gracias a la acción de varios grupos de bacterias y arqueas, la materia orgánica compleja se descompone, dando como productos finales un biogás y digestato (residuo estabilizado).

El biogás es un combustible formado básicamente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Su elevado contenido en metano (entre 50-70%) le proporciona una elevada capacidad calorífica, haciendo posible tras ser depurado para eliminar el vapor de agua y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) su uso en calderas (si la producción es pequeña) y/o en motores de cogeneración (cuando la producción es más elevada). El uso de biogás en motores de cogeneración permite obtener electricidad y calor. La electricidad, con la aprobación del Real Decreto 661/2007, puede entregarse a la red eléctrica, recibiendo una remuneración económica por parte de la compañía eléctrica. Por su parte, el calor generado en el motor puede ser empleado para diferentes usos (calefacción, agua caliente, secado, invernaderos, etc.). Si se realiza una purificación adecuada del biogás (hasta que su concentración en metano sea similar a la del gas natural – entre un 91% y un 95%), éste también puede emplearse como combustible de vehículos, pilas de combustible o ser incorporado a la red de gas natural.

El digestato (residuo orgánico que se obtiene como producto de la digestión anaerobia) está fuertemente degradado o estabilizado, y por lo tanto, puede utilizarse como enmienda fertilizante en el campo, ya sea directamente o tras ser sometido a un proceso de separación sólido líquido y posterior estabilización de la fracción sólida mediante compostaje.

El proceso de digestión anaerobia se produce a partir de la acción coordinada e interdependiente de un conjunto de microorganismos con metabolismos diferentes (Figura 3). Según el tipo de microorganismos y los sustratos que estos degradan, la digestión anaerobia se encuentra dividida en cuatro etapas diferenciadas:

- *Hidrólisis*. La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por las bacterias a menos que se hidrolice en compuestos solubles, los cuales sí pueden atravesar la membrana celular. La hidrólisis es, por tanto, el primer paso necesario para la degradación anaerobia de los sustratos orgánicos complejos. Esta etapa es llevada a cabo por enzimas extracelulares excretadas por las bacterias fermentativas y puede ser la fase limitante de la velocidad del proceso global en aquellos casos en que se traten residuos con alto contenido de sólidos.

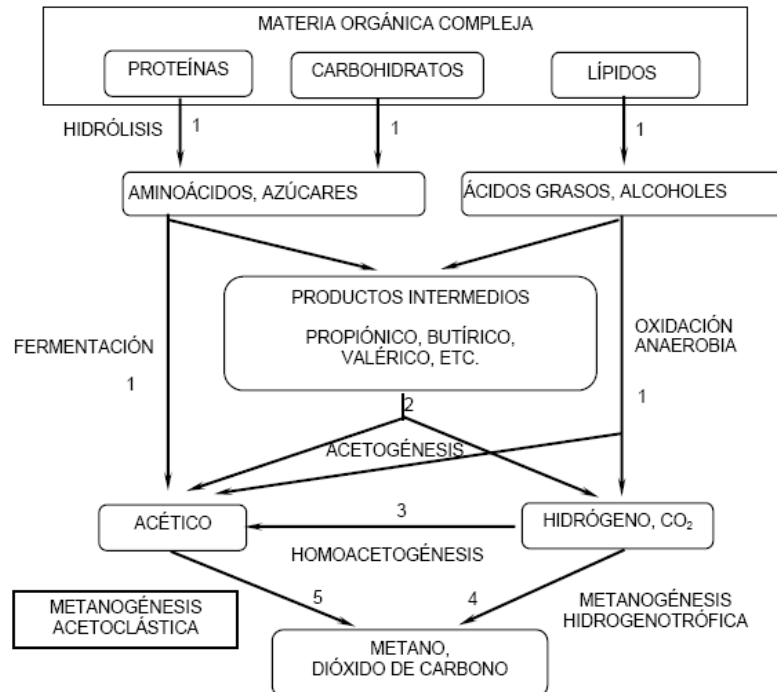


Figura 3. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas; 1) bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) bacterias acetogénicas; 3) bacterias homoacetogénicas; 4) bacterias metonogénicas hidrogenófilas; 5) bacterias metonogénicas acetoclásticas (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

- *Fermentación o acidogénesis.* En esta etapa, las moléculas orgánicas solubles son fermentadas por varios microorganismos fermentativos formando compuestos de menor peso molecular, tales como ácido láctico, etanol, ácido propiónico, ácido butírico y también ácido acético, ácido fórmico y H_2 .
- *Acetogénesis.* Un grupo especializado de bacterias denominadas acetogénicas sintróficas son las encargadas de convertir los productos finales de la etapa acidogénica en acetato a partir de dos rutas diferentes: deshidrogenación acetogénica (producen acetato a partir de la fermentación de ácidos grasos volátiles, lactato y alcoholes) e hidrogenación acetogénica (sintetizan acetato a partir de hidrógeno y dióxido de carbono).
- *Metanogénesis.* Las arqueas metanogénicas son las encargadas de la eliminación de los productos generados en las etapas anteriores y de la formación de CH_4 a partir de sustratos mono o bicarbonados. Atendiendo a esto, se establecen dos grandes grupos de arqueas metanogénicas: arqueas metanogénicas hidrogenotróficas (aquellas que consumen H_2 , CO_2 y ácido fórmico) y arqueas metanogénicas acetoclásticas (aquellas que consumen acetato, metanol y algunas metilaminas).

La digestión anaerobia ha sido ampliamente utilizada en la estabilización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de los lodos que se generan en los procesos de depuración aerobia de aguas residuales (Fernández-Polanco y García-Encina, 2006) y es un proceso idóneo para llevar a cabo el tratamiento de residuos ganaderos. Respecto a este proceso, el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020 indica que “*En lo que se refiere a la política específica de producción y uso de biogás, indicar que aparte de la retribución a la producción eléctrica y a la cogeneración con biogás, el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino publicó el 26 de diciembre de 2008 el Plan de Biodigestión de Purines, que tiene como finalidad reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la gestión de purines mediante el empleo de técnicas de digestión anaerobia. El objetivo cuantificable de este Plan es llegar a tratar mediante estas técnicas 9.470.000 t purín/año*”.

El aprovechamiento energético de los residuos ganaderos tiene un doble efecto positivo: reducción de las emisiones de GEI y reducción de las emisiones equivalentes debidas a la fuente fósil que sustituye. Sin embargo, la producción de biogás que se obtiene en el proceso de digestión anaerobia utilizando estos residuos como sustrato único no es muy elevada: 200-500 m³ biogás/ton SV⁹ (Tabla 1).

Tabla 1. Residuos agroindustriales susceptibles de ser tratados por (co)digestión anaerobia con sus potenciales de metanización (adaptado de Braun and Wellinger, 2003).

Residuos	Potencial (m³/ton SV)
Purines y estiércoles animales	200 - 500
Cultivos energéticos	350 - 1150
Residuos de cosechas	300 - 400
Subproductos vinícolas y de la industria de la cerveza	400 - 800
Residuos de la producción de alimentación animal	500- 650
Residuos de matadero	550 - 1000
Residuos de la producción de grasa animal y vegetal	1000

3 Co-digestión anaerobia

La co-digestión anaerobia consiste en el tratamiento anaerobio conjunto de una mezcla homogénea de 2 o más sustratos. La situación más habitual es cuando una cantidad significativa del sustrato principal (por ejemplo, lodos de depuradora o purines) se mezcla y digiere con cantidades minoritarias de un único o una variedad de sustratos adicionales (cosustratos). La principal ventaja de la codigestión anaerobia radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. Además de incrementar el potencial de producción de

⁹ SV = Sólido Volátil (medida del contenido en materia orgánica del residuo).

biogás, la adición de cosustratos fácilmente biodegradables confiere una estabilidad adicional al proceso.

Los dos factores principales que han potenciado la codigestión anaerobia en los últimos años son:

- El sobredimensionamiento de los digestores anaerobios en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, la adición de cosustratos ayuda a producir más biogás y, consecuentemente, más energía con un coste marginal adicional mínimo.
- La producción de biogás a partir de purines exclusivamente no es económicamente viable con los precios actuales del petróleo. Por lo tanto, la adición de cosustratos no sólo aumenta los rendimientos en biogás, sino que aumenta los beneficios a través de las bonificaciones.

La codigestión anaerobia ofrece varias ventajas ecológicas, tecnológicas y económicas, tales como la mejora en el balance de nutrientes, la optimización de las características reológicas de la mezcla alimentada al digestor, la mejora en la recuperación de biogás y, por tanto, en el balance económico del proceso. Sin embargo, al mezclar diferentes tipos de residuos se corre el riesgo de introducir sustancias tóxicas o inhibitoras para el proceso anaerobio, siendo preciso determinar la viabilidad de la mezcla, así como la proporción adecuada de cada sustrato. Además, la codigestión no debe esconder prácticas de dilución de contaminantes, tales como metales pesados. El control de la calidad del digestato también es un parámetro importante a tener en cuenta en el diseño y operación de los codigestores anaerobios.

En la Tabla 2 se muestran los buenos resultados conseguidos en términos de producción de metano para mezclas de residuos ganaderos con varios tipos de residuos industriales, de mataderos, glicerina, ensilado de maíz, etc.

Tabla 2. Potenciales metanogénicos de diversas mezclas de residuos orgánicos.

<i>Mezcla de residuos</i>	<i>m³CH₄/ton SV</i>	<i>Referencia</i>
Purín vacuno (100%)	300	Callaghan et al. (1999)
Purín vacuno-Residuo pesquero (78%:22%)	370	
Purín porcino-R. industrial (83%:17%)	560	Murto et al. (2004)
Purín porcino- R. industrial- R. matadero (71%:17%:12%)	620	
Purín porcino-R. industrial-R. matadero-R. vegetal y fruta (66%:17%:12%:5%)	680	
Purín porcino (100%)	220	Amon et al. (2006)
Purín porcino-Glicerina (94%:6%)	620	
Purín porcino-Ensilado de maíz-Maíz (54%:31%:15%)	340	
Purín porcino-Ensilado de maíz-Maíz-Glicerina (52%:29%:13%:6%)	440	

3.1 Plantas de biogás en Europa y en España

El sector del biogás no ha alcanzado nunca antes tanta atención como en los últimos años, pasando gradualmente de ser un sector de tratamiento de residuos a un sector de producción de energía. La producción de biogás como energía primaria en la Unión Europea en 2009 (Figura 4) se incrementó hasta 8,3 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo) y el 52% de esta producción proviene de plantas de producción de biogás construidas específicamente para la recuperación de energía (Biogas Barometer, 2010). Toda esta producción de biogás se traduce en 25,2 TWh de electricidad producida en la Unión Europea en 2009 (Tabla 3).

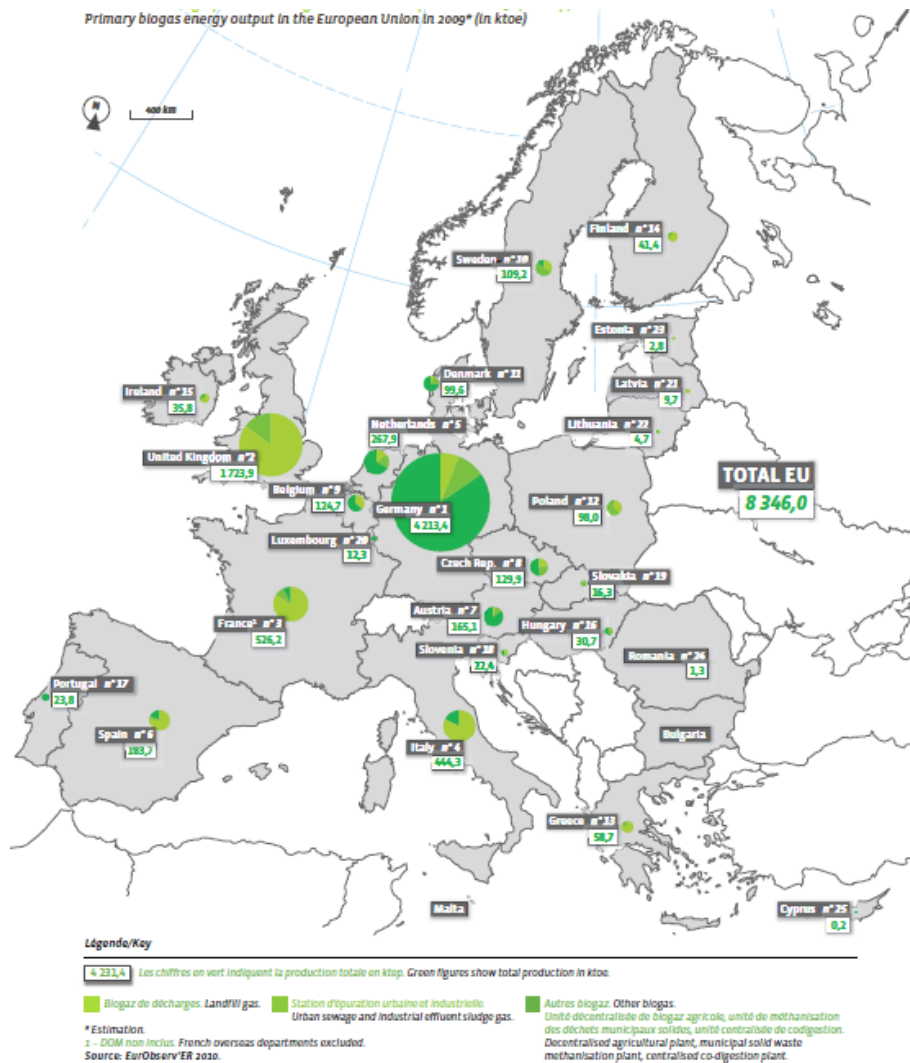


Figura 4. Producción de biogás como energía primaria en la UE en 2009 (Fuente: EurObserv'ER 2010).

Alemania lidera la producción de biogás en Europa, siendo ella sola la responsable de la producción de más de la mitad de biogás en el 2009 (50,5%, Figura 4) y ocupando también la primera posición en cuanto a la producción de biogás per cápita (Figura 5). Esto es debido a la existencia de casi 5000 plantas de biogás y, según la asociación de biogás alemana, se han construido más de 1000 plantas de biogás durante el 2009 y el 2010 (Biogas Barometer, 2010). La segunda posición, tanto en producción total de biogás (Figura 4) como en la producción per cápita (Figura 5), la ocupa el Reino Unido con valores de 1,7 Mtep y 27,8 tep/1000 habitantes. España ocupa la cuarta posición en cuanto a producción total (183,7 ktep, Figura 4) y la décimosexta en producción per cápita (4,0 tep/1000 habitantes, Figura 5).

Tabla 3. Producción de energía eléctrica (en GWh) a partir de biogás en la UE en 2008 y 2009 (Fuente: EurObserv'ER 2010).

En ktep/ In ktoe	2008			2009*		
	Centrales électriques seules/ Electricity-only plants	Centrales fonctionnant en cogénération/ CHP plants	Électricité totale/ Total electricity	Centrales électriques seules/ Electricity-only plants	Centrales fonctionnant en cogénération/ CHP plants	Électricité totale/ Total electricity
Germany	8 837,0	1 142,0	9 979,0	11 325,0	1 237,0	12 562,0
United Kingdom	4 844,9	460,0	5 304,9	5 064,7	526,8	5 591,5
Italy	1 290,8	308,7	1 599,5	1 374,1	365,5	1 739,6
Netherlands	83,0	651,0	734,0	82,0	833,0	915,0
France**	605,6	94,7	700,3	671,4	175,0	846,4
Austria	557,0	45,0	602,0	602,0	36,0	638,0
Spain	540,0	44,0	584,0	479,0	48,0	527,0
Belgium	174,2	159,1	333,3	175,2	286,7	461,8
Czech Republic	63,2	203,7	266,9	241,6	199,6	441,3
Denmark	1,5	297,2	298,7	1,3	323,5	324,7
Poland	0,0	251,6	251,6	0,0	319,2	319,2
Greece	171,0	20,3	191,3	183,5	34,0	217,5
Ireland	110,0	17,0	127,0	100,0	17,0	117,0
Hungary	0,0	68,2	68,2	0,0	95,2	95,2
Portugal	63,0	8,0	71,0	73,0	10,0	83,0
Slovenia	9,7	46,2	55,9	9,7	59,2	68,8
Luxembourg	0,0	43,8	43,8	0,0	53,4	53,4
Latvia	2,3	37,3	39,6	3,0	42,0	45,0
Sweden	0,0	30,0	30,0	0,0	34,0	34,0
Finland	0,0	29,0	29,0	0,0	31,0	31,0
Slovakia	1,0	14,0	15,0	1,0	20,0	21,0
Lithuania	0,0	9,0	9,0	0,0	15,0	15,0
Cyprus	0,0	12,0	12,0	0,0	12,0	12,0
Estonia	9,3	0,0	9,3	10,0	0,0	10,0
Romania	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0
European Union	17 364,5	3 991,8	21 356,3	20 397,4	4 773,0	25 170,4

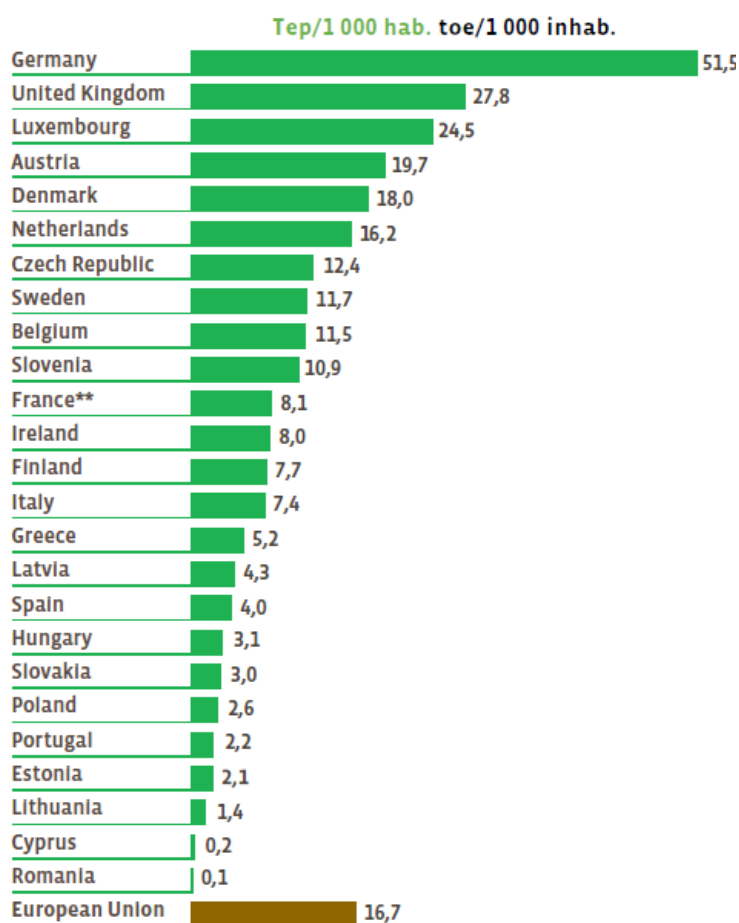


Figura 5. Producción de biogás per cápita (en tep/1000 hab) en la UE en 2009 (Fuente: EurObserv'ER 2010).

En cuanto a la producción de biogás agroindustrial, Dinamarca cuenta con una gran experiencia en la explotación de plantas de biometanización, contando con más de 20 plantas centralizadas y más de 55 plantas individuales, muchas de ellas utilizando un sistema de codigestión de mezclas de diferentes tipos de residuos orgánicos, incluyendo los agroindustriales. En España, a pesar de ser el primer país de la UE con mayor superficie dedicada a la agricultura, el sector del biogás agroindustrial aún no se encuentra muy desarrollado, existiendo algunas plantas en Cataluña y una en Valencia. Sin duda, el potencial de biogás agroindustrial que hay en España (Figura 6) y la reciente Directiva 2009/28/CE sobre Energías Renovables convertirán la producción de biogás agroindustrial en un área emergente en los próximos años.

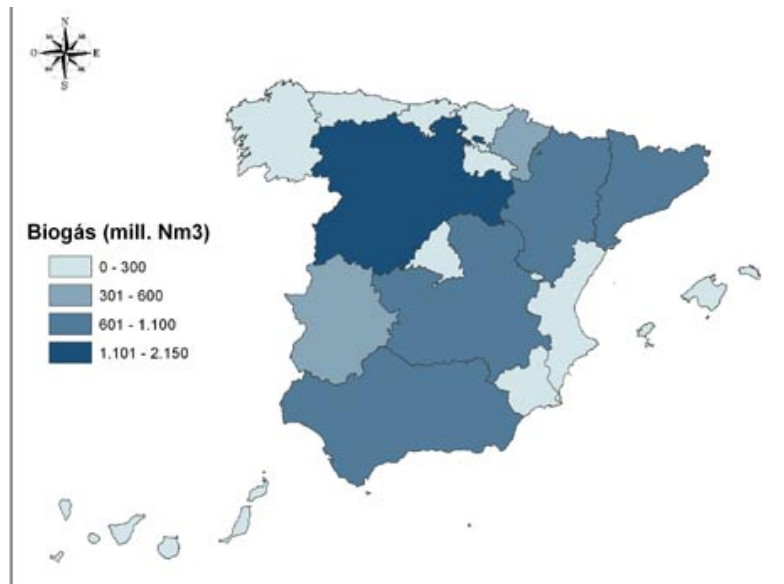


Figura 6. Estimación del potencial de producción de biogás en España a partir de residuos agroindustriales (Fuente: Proyecto Probiogás).

4 Aprovechamiento energético del biogás

Con independencia del grado de madurez de las tecnologías de aprovechamiento energético del biogás, en la Tabla 4 se indican los rangos de potencia, los costes y las eficacias de las más comúnmente utilizadas.

La venta de electricidad procedente del biogás en régimen especial está regulada por el Real Decreto 661/2007. Este Real Decreto organiza las tecnologías de producción eléctrica por grupos, atendiendo en primer lugar a si se produce electricidad y calor de forma combinada (cogeneración) o no, después atiende a la fuente empleada, cuando sólo se produce energía eléctrica (resto de los grupos). También se considera la potencia máxima entregable, mejorando la retribución de las plantas más pequeñas.

Tabla 4. Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás (Fuente: IDAE, 2007).

<i>Tecnología</i>	MCIA^a	Micro-turbina	Turbina de gas	Stirling	Pilas de combustible
Tamaño (MW)	0,03 – 0,6	0,001 – 0,4	0,5 – 30	0,0250 – 0,055	0,1 – 3
Coste de instalación (€/MW)	560000-965000	950000-1350000	325000-725000	900000-1600000	3200000-4000000
Costes de O&M (€/MWh)	6,2 - 16	6,4 – 12	3,2 – 8	4 – 6,4	1,5 – 12,3
Eficiencia sobre PCI ^b (%)	30 - 42	14 - 30	21 - 40	30	26 - 50

^aMCIA = Motores de Combustión Interna Alternativos.

^bPCI = Poder calorífico inferior.

Referencias

Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Pötsch, E., Zollitsch, W. (2006). Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. *Inter. Congress Series*, **1293**, 217-220.

Biogas Barometer (2010). EurObserver. <http://www.eurobserv-er.org/pdf/baro200b.pdf>

Braun, R., Wellinger, A. (2003). Potential of Co-digestion. IEA Bioenergy. Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas.

Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, T., Forster, C.F. (1999). Co-digestion of waste organic solids: Batch studies. *Bioresour. Technol.* **67**, 117-122.

Danés, R., Molina, V., Prats, I.L., Álamos, M., Boixadera, J., Torres, E. (1996). Manual de gestió dels purins i de la seva reutilització agrícola. Editado por la Generalitat de Catalunya. Barcelona.

EUROSTAT.

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>

Fernández-Polanco, M., García-Encina P.A. (2006). Application of biological treatment systems for sulfate-rich wastewaters. In: *Advanced Biological Treatment Process for Industrial Wastewaters*. IWA Publishing, London, UK, pp. 213-236.

Hobson, P.N. (1990). The treatment of agricultural waste. In: *Anaerobic digestion: a waste treatment technology. Critical Reports on Applied Chemistry*, **31**, 93-138.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE, 2003). Biomasa. Digestores anaerobios. Pp. 1 – 48.

Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales (2010). Proyecto Probiogás (www.probiogas.es).

Ministerio de medio ambiente, rural y marino (MARM). www.marm.es.

Murto, M., Björnsson, L. y Mattiasson, B. (2004). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *J. Environ. Manag.*, **70**, 101-107.

Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gómez E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Control*, **21** (5-6), 411-490.

Aspectos generales de la generación eólica

Antonio Sánchez Káiser

Depto. de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena

1 Introducción

Por todos es conocida la novela de Don Miguel de Cervantes “El Ingenioso Hidalgo Don Quijote de la Mancha” donde se narra cómo el protagonista, llevado por su locura, arremete contra unos molinos manchegos al confundirlos con gigantes:

“...ves allí, amigo Sancho, donde se descubren treinta o poco más desaforados gigantes con quien pienso hacer batalla, y quitarles a todos las vidas,... ¿Qué gigantes? dijo Sancho. Aquellos que allí ves, respondió su amo, de los brazos largos, que los suelen tener algunos de casi dos leguas. Mire vuestra merced, respondió Sancho, que aquellos que allí se parecen no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en ellos parecen brazos son las aspas, que volteadas del viento hacen andar la piedra del molino.”

Seguramente muchos de nosotros no tomaríamos por loco al Ingenioso Hidalgo si lo enfrentásemos a una máquina eólica actual de 7.500 kW y 150 metros de diámetro de rotor. La pregunta que tendríamos que hacernos en este punto es ¿cómo hemos llegado hasta aquí?, ¿por qué la tecnología nos ha conducido a sistemas de esta índole? Podríamos argumentar que existe una mayor conciencia social sobre el impacto ambiental que las energías no renovables ocasionan o incluso que las energías renovables se han puesto de moda en los últimos años. Sin embargo, quizás sea la crisis energética de

1973 el punto de inflexión en el que fundamentalmente los países no productores de petróleo decidieron apostar fuertemente por la investigación en el campo de las energías renovables en general y de la energía eólica en particular. En España, este desarrollo fue lento hasta 1997, momento en el que se aprueba la nueva Ley del Sector Eléctrico que establece la prioridad de las fuentes del Régimen Especial (minihidráulica, solar fotovoltaica, eólica, biomasa y cogeneración), con la que se abona por cada kwh de electricidad una prima a estas energías.

La energía eólica representa hoy en día una de las fuentes energéticas más baratas y con una tecnología de aprovechamiento totalmente madura y puesta a punto, lo que puede resultar difícilmente creíble para quien no se encuentre muy cercano de los desarrollos actuales.

2 La utilización del viento como fuente de energía

El fenómeno conocido como viento está constituido por las corrientes de aire generadas a consecuencia del desigual calentamiento de la superficie de la tierra. La no uniformidad del flujo de radiación solar incidente hace que unas zonas se calienten más que otras, provocando movimientos convectivos de la masa atmosférica. El aire caliente asciende, arrastrando aire más frío proveniente de una región vecina. Al subir se enfría, por lo que aumenta su densidad, descendiendo para volver a repetir el ciclo. A estos vientos generados por el desigual calentamiento de la superficie terrestre se les llama vientos geostroficóicos.

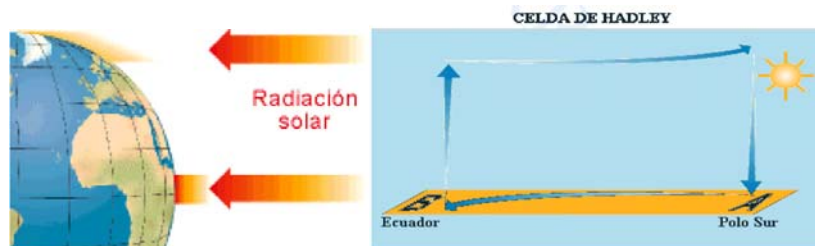


Figura 1. Modelo de la circulación del viento.

A altitudes de hasta 100 metros sobre la superficie terrestre, los vientos están mucho más influenciados por las características de dicha superficie. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos. Por ello, y debido a la rotación de la tierra, las direcciones del viento cerca de la superficie serán ligeramente diferentes de las de los vientos geostroficóicos.

Teniendo en cuenta que nuestros molinos se encuentran situados a pocos metros de la superficie de la tierra, para el aprovechamiento de la energía eólica con los molinos de viento resulta interesante conocer los vientos de superficie. Aunque los vientos globales son importantes en la determinación de los vientos dominantes de un área determinada, las condiciones climáticas locales pueden influir en las direcciones de viento más comunes. Los vientos locales siempre se superponen en los sistemas eólicos a gran escala, esto es,

la magnitud y dirección del viento está influenciada por la suma de los efectos global y local. Cuando los vientos a gran escala son suaves, los vientos locales pueden dominar los regímenes de viento. Los principales efectos locales son las brisas marinas, los vientos de montaña, las variaciones diurnas, el efecto túnel y el efecto colina, entre otros.

De este modo, el viento, al considerarlo como recurso energético y desde el punto de vista de su disponibilidad como suministro, tiene sus características específicas: es una fuente con sustanciales variaciones temporales, a pequeña y gran escala de tiempo, y espaciales, tanto en superficie como en altura, sin olvidar una componente aleatoria que afecta en gran parte a su variación total. Al mismo tiempo hay que considerar que la energía disponible a partir del viento depende de la velocidad del mismo al cubo, por lo que pequeñas variaciones en este parámetro afectarán en gran medida al resultado final de energía obtenida.

2.1 Energía aprovechable

Antes de entrar en detalles descriptivos del tipo de sistemas necesarios para un aprovechamiento eólico, hemos de introducir dos conceptos fundamentales que han de ser tenidos en cuenta. El primero de ellos, el coeficiente de potencia, nos da una idea de la potencia que realmente estamos obteniendo a través del sistema eólico. La potencia que posee el viento incidente sin perturbar viene dada por la expresión:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (1)$$

Sin embargo, un aerogenerador no es nunca capaz de llegar a capturar el 100% de esta potencia que posee tal viento incidente, de tal manera que la potencia capturada por el rotor de la máquina es significativamente menor. El coeficiente de potencia de un aerogenerador expresa qué cantidad de la potencia total que posee el viento incidente es realmente capturada por el rotor de dicho aerogenerador. Se define como:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} \quad (2)$$

donde P es la potencia realmente capturada por el rotor. Este coeficiente es adimensional. Por otra parte, hay que hacer notar que el coeficiente de potencia con que funciona un aerogenerador en general no es constante, pues varía en función de las condiciones de funcionamiento de la máquina.

El primero en estudiar los motores eólicos fue Betz, quien por una serie de razonamientos determinó la máxima potencia extraíble de una vena fluida. Partiendo de la teoría ideal, Betz dedujo que el máximo valor de potencia susceptible de ser extraído de la vena fluida es:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3, \quad (10)$$

expresión que se conoce como *fórmula de Betz* y que nos proporciona la máxima potencia que podemos extraer de una corriente de aire. La relación

$$\frac{P_{max}}{P_o} = \frac{\left(\frac{8}{27} \rho S V_1^3\right)}{\left(\frac{1}{2} \rho S V_1^3\right)} = \frac{16}{27} = C_P \quad (11)$$

representa el coeficiente de potencia máximo (límite de Betz) y nos servirá para caracterizar el rendimiento de un rotor eólico.

3 Clasificación de los sistemas eólicos

Las aplicaciones de la energía eólica pueden agruparse en tres bloques principales: producción de energía eléctrica, transformación en energía potencial y otras aplicaciones industriales. La primera de éstas es la más extendida y la que más se está utilizando en la actualidad, tanto para sistemas conectados a la red como para sistemas aislados de la misma, sobre todo en el campo de las grandes potencias. En cuanto al bombeo de agua podemos decir que tuvo su apogeo en el siglo XIX, aunque sigue utilizándose en países en vías de desarrollo. Actualmente se está extendiendo su uso para esta aplicación en pequeñas aeroturbinas que inicialmente generan energía eléctrica y posteriormente alimentan una bomba de pozo. En cuanto al último de los bloques indicados, su uso está bastante más limitado.

Estas aplicaciones básicas se pueden llevar a cabo con sistemas de baja, media y alta potencia. Aunque se han establecido diferentes clasificaciones al respecto, consideraremos como pequeña potencia aquellas máquinas eólicas que suministran una potencia inferior a los 50 kW, como media potencia máquinas de una potencia nominal de algunos cientos de kW (o dicho de otra forma, máquinas cuya superficie de captación tenga una dimensión característica entre 15 y 30 m, oscilando entre 50 y 300 kW), y como gran potencia aquellas que sobrepasan el rango unitario del megavatio (generalmente comprendidas entre 300 y 10.000 kW).

3.1 *Sistemas de baja potencia*

Son máquinas pequeñas que se utilizan para alimentar cargas que están alejadas de las redes eléctricas convencionales. Típicamente, se combinan con bancos de baterías para almacenar la electricidad que generan y poder acoplar en el tiempo la generación con la demanda. En el mercado actual se ofrecen con una capacidad unitaria inferior a 35 kW pero se pueden integrar conjuntos con varias unidades para suministrar energía eléctrica a cargas mayores (por ejemplo para electrificación rural). Con frecuencia, este tipo de aerogeneradores se combinan con generadores diesel como apoyo y, dependiendo de las necesidades de suministro de electricidad y de la disponibilidad de los recursos energéticos no convencionales, se pueden combinar también con sistemas fotovoltaicos, microturbinas hidráulicas y otros, dando lugar a combinaciones que se conocen como "sistemas híbridos".



Figura 2. Sistema eólico de pequeña potencia.

3.2 Sistemas de media potencia

Son sistemas cuya potencia media ronda los 150 kW y tiene como principales aplicaciones la generación de energía eléctrica y el bombeo de agua. La generación de energía eléctrica en estos sistemas se aplica a colectividades mayores, y como el problema del almacenamiento es mayor, solo cabe su utilización como fuente complementaria conectada a la red principal o bien en combinación con un motor diesel para abastecer una pequeña red local. El bombeo de agua con una potencia puesta en juego mayor no presenta problemas si se dispone de depósitos adecuados. Pueden ser interesantes otros usos agrícolas, como secado y transporte de grano, que pueden exigir potencias entre 60 y 150 kW. El transporte sería neumático, a partir de la corriente de aire generada por una soplante accionada por el aerogenerador.

3.3 Sistemas de gran potencia

Son máquinas de gran tamaño que se conectan a una red eléctrica convencional para alimentar cargas específicas de capacidad importante o para construir centrales eoloeléctricas. Los tamaños en cuanto a producción de potencia se refiere oscilan entre 300 kW y 10.000 kW. A pesar de los distintos conceptos de aeroturbinas ensayados, los que actualmente se imponen por su grado de madurez tanto en aspectos técnicos como económicos son los de eje horizontal. Los subsistemas principales que integran un aerogenerador de eje horizontal se listan a continuación:

- Rotor.
- Tren de potencia.
- Generador eléctrico.
- Subsistema de orientación al viento.
- Subsistema de regulación de potencia.
- Subsistemas de seguridad.
- Chasis principal.

- Torre.

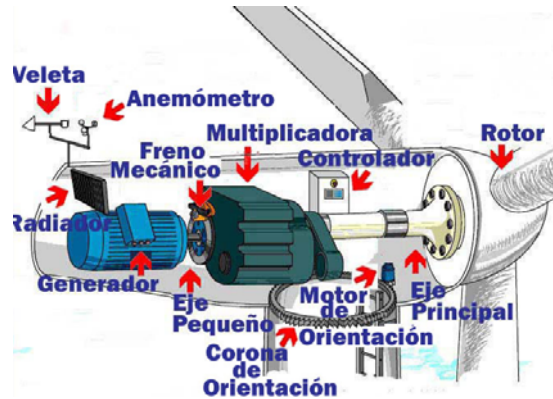


Figura 3: Componentes de una turbina eólica de gran potencia. (Fuente: www.ecovive.com/energia-eolica).

Para transformar la energía eólica en electricidad, un aerogenerador capta la energía cinética del viento por medio de su rotor aerodinámico y la transforma en energía mecánica en el eje de rotación. La energía mecánica se transmite al generador eléctrico.

En general, el rotor aerodinámico está formado por un conjunto de dos o tres palas o aspas. Por razones de diseño estructural y aerodinámico, para máquinas entre 300 y 10.000 kW, la velocidad en el extremo de la pala se limita a valores entre 42 y 86 m/s (64 m/s en promedio), lo que se traduce en velocidades angulares entre 6 y 65 r.p.m. (35 r.p.m. en promedio). Por lo tanto, si se usan generadores eléctricos convencionales que operan a velocidades nominales altas (1.200, 1.800 r.p.m.), es necesario utilizar una caja de engranes para efectuar el acoplamiento.

Otro de los sistemas necesarios para captar el máximo de energía de la vena fluida es el sistema de orientación. En efecto, si la dirección del viento no es perpendicular al plano del rotor la energía obtenida se ve penalizada. Para conseguir dicha orientación perpendicular, la gran mayoría de los aerogeneradores comerciales utilizan sistemas activos basados en servomecanismos, aunque también los hay controlados aerodinámicamente.

En función de las condiciones de viento existentes el rango de operación de un aerogenerador variará. Este rango será función de la relación eficiencia-resistencia-costo. Por ello, es imprescindible limitar su velocidad de rotación y su potencia de salida a niveles que no pongan en riesgo su integridad física. Los métodos que se emplean van desde diseños pasivos (palas fijas diseñadas para abatir aerodinámicamente la velocidad angular del rotor a partir de una velocidad del viento específica), hasta el uso de servomecanismos para controlar el ángulo en que el perfil aerodinámico de las palas se presenta al viento.

Los aerogeneradores cuentan con dos o más subsistemas de seguridad enfocados a minimizar la ocurrencia de fallos que pudieran traducirse en daño a los humanos, así como a salvaguardar la integridad física del equipo.

Con el fin de coordinar los grandes parques eólicos destinados a la producción de electricidad a gran escala es necesario un sistema electrónico de control y adquisición de datos conocido frecuentemente como SCADA. El control de los parámetros operacionales de cada aerogenerador se lleva a cabo en el ámbito local de la máquina.

El chasis principal es una estructura metálica donde se monta el tren de potencia, el generador eléctrico, las mordazas del freno y, en su caso, las unidades hidráulicas. Recibe las cargas del rotor a través del tren motor y las transmite a la torre vía el subsistema de orientación.

Como bien es sabido, el efecto de capa límite de la superficie terrestre ocasiona una variación de los vientos en el plano vertical. Es por ello que resulta interesante (para el caso de aerogeneradores de eje horizontal) situar el rotor a una altura considerable respecto al nivel marcado por dicha superficie terrestre. Esta altura óptima resultará de una situación de compromiso entre el aumento de energía capturada al elevar la altura del rotor y el aumento del coste de la torre. En general, se utilizan torres en el rango de 60 a 160 metros de altura.

La potencia proporcionada por un aerogenerador se representa por un gráfico denominado curva de potencia, donde se relaciona la potencia eléctrica que entrega el sistema con la velocidad del viento a la altura del centro de su rotor.

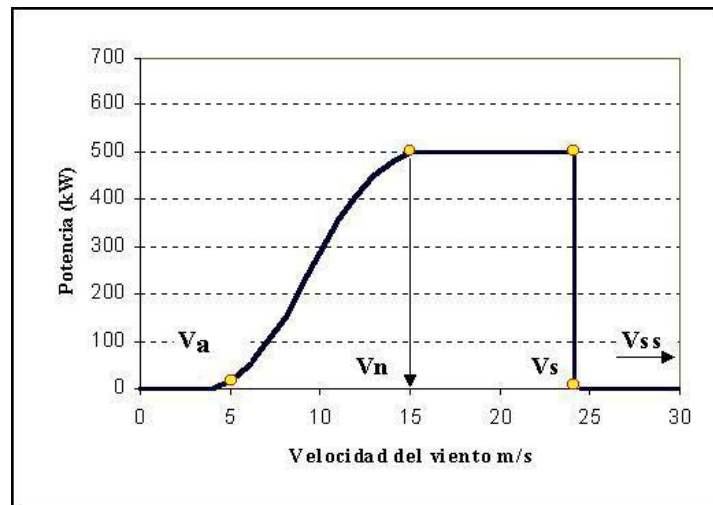


Figura 4. Curva de potencia de una máquina eólica de 500 kW de potencia.

La Figura 1 muestra la curva correspondiente a un aerogenerador de 500 kW de potencia nominal. Este tipo de curvas se utilizan como un dato de entrada para estimar la cantidad de energía eléctrica que un aerogenerador específico produciría al operar bajo un régimen de viento dado.

La obtención de la curva de potencia de una aeroturbina está sujeta a un procedimiento experimental estándar fijado por la Comisión Electrotécnica Internacional en la norma IEC-61400-2. Existen centros de prueba

especializados en las pruebas de comportamiento de aerogeneradores, tal como los Laboratorios RISO en Dinamarca.

En estas curvas existen cuatro puntos de referencia cuyos valores trascienden en cuanto a la respuesta operacional de los aerogeneradores. Estos puntos son:

Va, velocidad de arranque o inicio: Velocidad del viento a la cual un aerogenerador empieza a producir energía eléctrica.

Vn, velocidad nominal: Velocidad del viento a la cual se alcanza el valor nominal de potencia del generador eléctrico.

Vs, velocidad de parada o salida: Velocidad del viento a la que un aerogenerador tiene que ejecutar un paro forzado para no operar por arriba de sus límites máximos de diseño.

Vss, velocidad de supervivencia: La velocidad del viento por encima de la cual el rotor de un aerogenerador puede sufrir daños permanentes a pesar de que se encuentre frenado.

Escenario futuro

Uno de los escenarios planteados por la Unión Europea para el año 2050 es que el 100% de la energía eléctrica consumida en Europa provenga de fuentes renovables. Dentro de este "mix" energético de fuentes renovables, la energía eólica se presenta como aquella de mayor impulso en los últimos años y con mayores perspectivas de futuro. Las posibilidades más significativas de crecimiento en este sector se encuadran en las instalaciones eólicas en el mar, con la definición de una normativa cada vez más plausible que permita la extensión en ella del mercado eólico. En este escenario, los nuevos diseños de máquinas eólicas se dirigen a prototipos cada vez de mayor tamaño (de entre 10 y 20 MW) con plataformas flotantes que permitan su instalación en aguas más profundas. El escaso coste medioambiental que este tipo de energía representa y el grado de madurez que esta tecnología ha alcanzado, hacen presuponer que este escenario planteado es más un presente cercano que un futuro incierto, aunque citando a Jacques Anatole France "*El futuro está oculto detrás de los hombres que lo hacen.*"

Referencias

EWEA, The European Wind Energy Association (2011). Pure Power. Electronic Edition.

AIE (2010). World Energy Outlook. International Energy Agency, Paris.

Berrutti. F. (2010). Modelado y control de turbinas de aerogeneradores de velocidad variable. IEEE encuentro de especialista en energía, potencia, instrumentación. Montevideo, Uruguay.

Clark. K. (2010). Development of low speed wind tunnel. Master of Applied Science. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Carleton University. Ontario. Canada.

CIEMAT (2006). Situación de la energía en el Mundo, Europa y España. Disponible *on line*

IDAE (2010). Observatorio de Energías Renovables. Disponible *on line* (Marzo 2011).

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2010). Plan de Energías Renovables 2011-2020. Secretaría de Estado de Energía.

Sánchez Kaiser., A Viedma (2003). Energía eólica. Editorial. Horacio Escarabajal, España.

El futuro de la biomasa

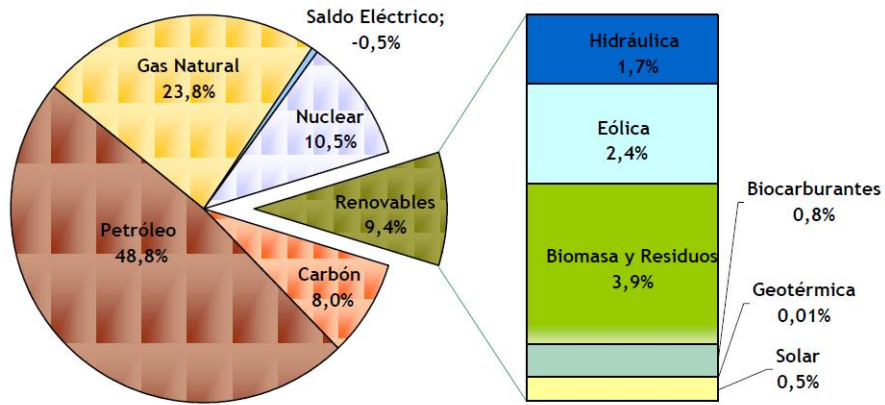
Dr. Luis Ortíz Torres

Depto. de Ingeniería Forestal. Universidad de Vigo

1 Introducción

El sector transporte genera muchas emisiones de diferentes gases y partículas en el aire. Los gases son emitidos por la combustión de los combustibles fósiles en los motores de los automóviles. Dichas emisiones tienen un efecto negativo sobre la salud humana y son responsables de cambios en el comportamiento del entorno. Algunos de esos gases son gases de efecto invernadero como CO₂, CH₄, N₂O, etc. Hay una evidencia clara de la relación entre gases de efecto invernadero y cambios mundiales del clima. Estos efectos ambientales negativos junto con demandas energéticas cada vez mayores en el ámbito mundial y disminución de los combustibles fósiles en un futuro próximo, en combinación con transporte a larga distancia han tenido un impacto positivo en el desarrollo de nuevas fuentes energéticas.

Las fuentes renovables de biomasa representan hoy en día más del 30% de toda la energía consumida en el tercer mundo y el 15% del consumo energético mundial total. En España supone cerca del 40% de la aportación de todas las energías renovables.



Fuente: MITYC/IDAE

Figura 1. Consumo de energía en España.

El 50% de toda la energía renovable generada en la UE es de origen biomásico. Además, el empleo de esta biomasa permite secuestrar importantes cantidades de CO₂ atmosférico.

El CO₂ producido por la quema de biomasa no computa a efectos del Protocolo de Kyoto, por lo que las industrias afectadas tienen en la biomasa sólida una opción limpia que permite reducir cuotas de emisión.

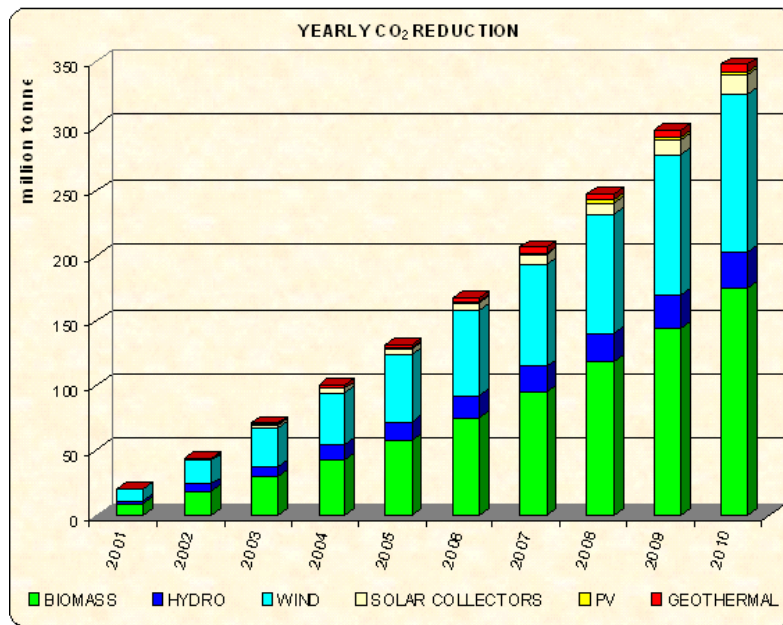


Figura 2. Reducción de emisiones de CO₂ en Europa.

Por otro lado, casi el 60% de los más de 3.500.000 m³ de madera que se consumen anualmente en el mundo, se usa con fines energéticos.

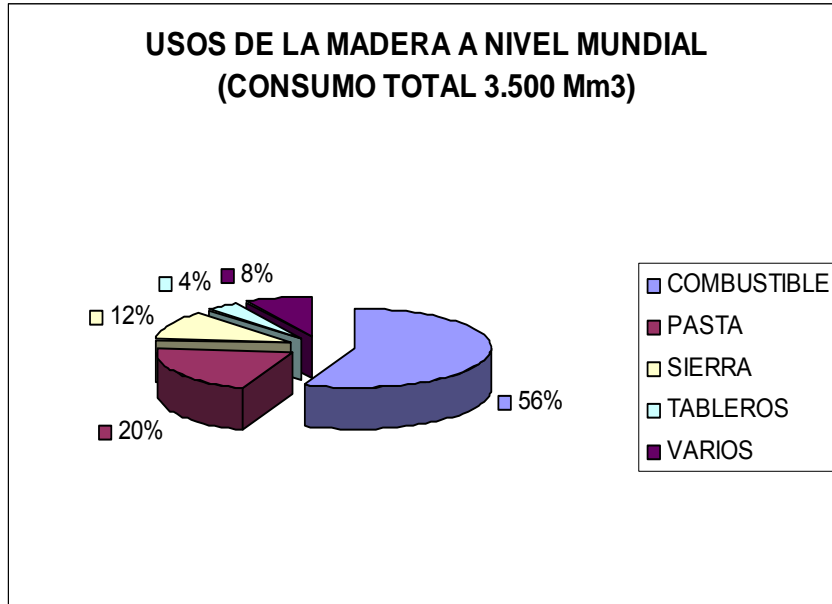


Figura 3. Usos de la madera a nivel mundial.

En Galicia la industria de la madera tiene instalados más de 500 MW térmicos y unos 50 MW eléctricos alimentados con biomasa.

La UE pretende que en 2012 la aportación de la biomasa sea el 12% del total de energía consumida en Europa, para que en 2020 llegue a representar el 20% de toda la energía consumida. Estas políticas han sido asumidas y desarrolladas por el Gobierno Español.

Las ventajas y oportunidades del uso de biocombustibles permiten generar empleo rural e industrial, generar tejido empresarial, fijar población rural, reducir importaciones de derivados del petróleo y emisiones contaminantes.

Existen numerosas aplicaciones comerciales como la gasificación, la pirólisis, la torrefacción o la producción de biocombustibles de segunda generación para la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, etc.

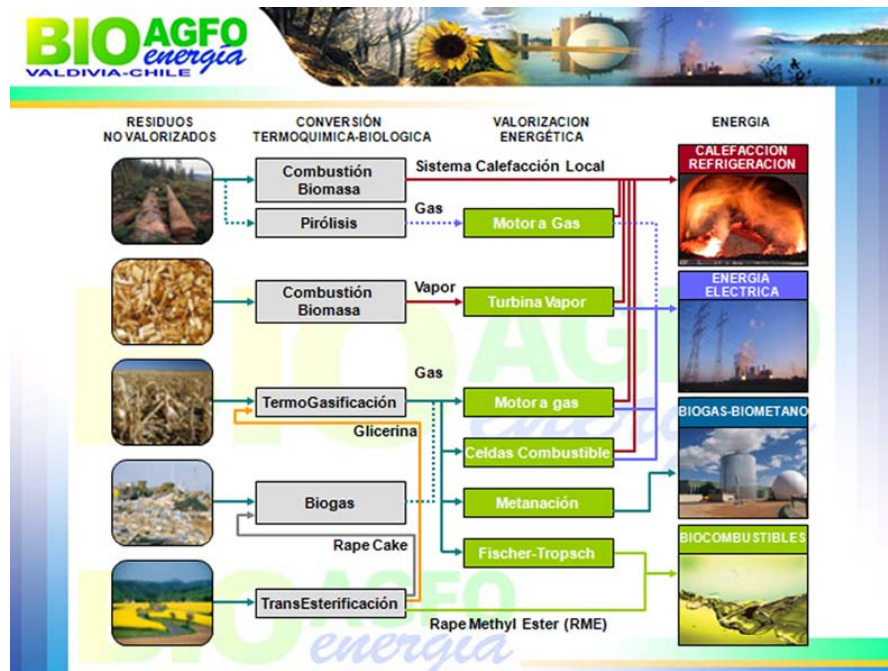


Figura 4. Procesos de aprovechamiento energético con biomasa.

2 Situación en Galicia

En la Comunidad existen algunas de las primeras instalaciones de gestión de biomasa mediante combustión (Allariz), peletizado (Bastabales) y briquetado (Vigo) del Estado.

Por otra parte, prácticamente la mitad de la superficie de Galicia es de terreno forestal. Esos más de 2.000.000 ha representan cerca del 50% de las masas forestales españolas.

Los montes gallegos producen unos 13.000.000 m³ de madera cada año, de la que se explotan sólo unos 7 millones de metros cúbicos. Esta cantidad supone el 50% de toda la madera que se corta en España.

La superficie forestal en Galicia se incrementa en torno a un 1% anualmente.

Los residuos y subproductos forestales y de la industria de la madera generados en Galicia se estiman en unas 3.000.000 t, de los cuales ya se explotan actualmente unas 2.000.000 t.



Figura 5. Tipos de residuos biomásicos.

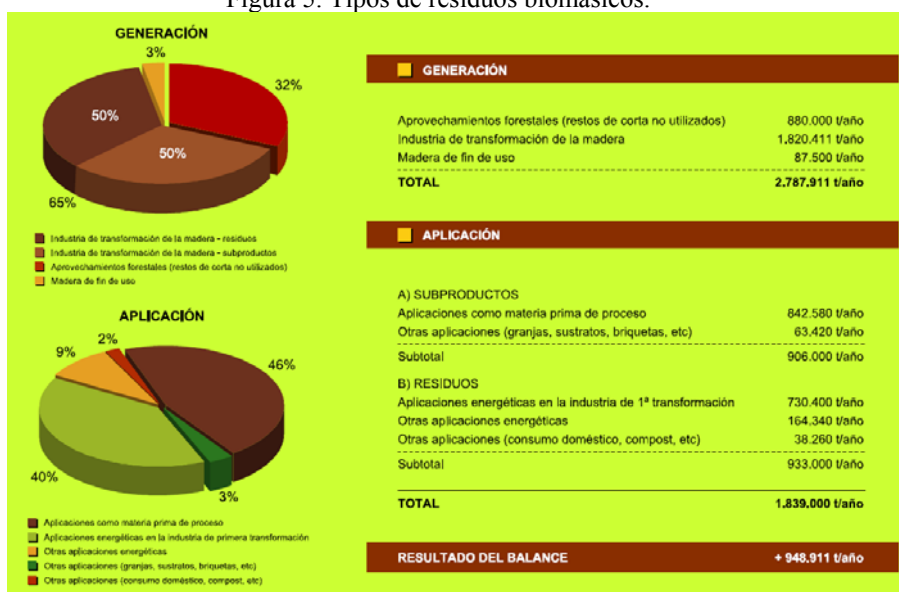


Figura 6. Producción y consumo de biomasa en Galicia.

Los incendios forestales se producen y propagan, en gran medida, por la acumulación de combustibles forestales inaprovechados, que podrían valorizarse energéticamente en forma de combustibles que no producen lluvia ácida ni otro tipo de emisiones contaminantes.

En Galicia, estrategias recientes como la Ley de Incendios, que obliga a la limpieza de carreteras, caminos, fincas, etc., o como la creación del Banco de Tierras y las Unidades de Gestión Forestal (UXFOR, SOFOR) o el mantenimiento de brigadas forestales más allá de la campaña de verano, son,

sin duda, un importante paso en la modernización de las estructuras tradicionales de gestión de los terrenos forestales.

Todas estas iniciativas encaminadas a limitar la lacra recurrente de los incendios forestales van a permitir generar enormes cantidades de biomasa residual, que puede ser utilizada con fines energéticos. Por cada 2,5 kg de residuo se ahorra 1 kg de petróleo y, si no se da una salida viable a esta enorme cantidad de biomasa, se pueden producir problemas colaterales

Asimismo, las centrales térmicas pueden, hoy en día, mezclar carbón con biomasa (co-combustión), en hasta un 5% del total para reducir las emisiones contaminantes y costes por los pagos de derechos de emisión, según lo establecido en el Protocolo de Kyoto.

Ámbito de aplicación de cada central (25km)

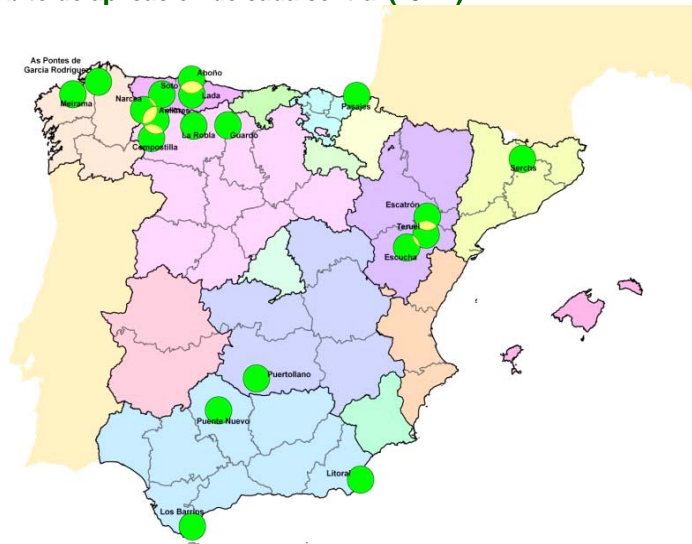


Figura 7. Centrales térmicas de carbón en España.

Por todo lo expuesto, parece claro el papel que Galicia puede jugar en este campo, siempre que se garanticen los aspectos medioambientales y de impacto sobre el terreno (erosión y escorrentía) y pérdida de nutrientes (desfertilización) y se garantice el suministro clásico de madera a la industria forestal, puesto que en Galicia hay más de 300 aserraderos (60% de la producción del Estado), 24 líneas de fabricación de tableos (40%) y una fábrica de pasta (34% de la producción nacional).

Para garantizar estos aspectos y cumplir las previsiones de incremento será imprescindible producir biomasa mediante cultivos energéticos agrícolas y forestales de corta rotación (1-5 años), para producir materias primas con fuerte demanda y previsiones de crecimiento, incluso para la exportación, como hacen otras Comunidades.

Por otra parte, en Galicia hay unas 600.000 ha improductivas en las que ya vegetan especies *malditas* como las acacias, los tojos o los eucaliptos, que

gestionados como cultivos energéticos evitarían la introducción de plantaciones energéticas típicas de otras regiones como cardos, chopos, sauces, abedules, patacas, paulonias, etc., que se emplean con éxito en otras regiones.

3 Producción de calor en el sector terciario

Por otra parte, productos derivados de la biomasa primaria, como son las briquetas o los pelets representan una nueva opción de uso térmico para el sector doméstico y de servicios.

Las industrias de producción de pelets y briquetas combustibles han incrementado su presencia a nivel global y suministran éstos productos a escala mundial como sustitutivos del gas oil y fuel y gas natural, para calefacción doméstica y usos industriales.

Las aplicaciones industriales como en el sector terciario y residencial, mediante productos sofisticados como las briquetas y los pelets, permiten reducir la contaminación atmosférica en las ciudades.



Figura 8. Ejemplos de biomasa peletizada y briquetada.

El futuro de este sector está garantizado debido a las ventajas en el coste final de la energía. En España hay unas 50 plantas de paletizado que producen entre 300.000t y 500.000 t de pelets que se exportan en un 80% a países europeos.

Existe un mercado transnacional y se importa desde Chile o Brasil y Canadá, incluso desde China, mientras nosotros exportamos a Europa.

Asimismo, la escasez de materias biomásicas de calidad suficiente para el sector residencial puede ser una limitación, que puede subsanarse mediante el empleo de cultivos energéticos de corta rotación.



Figura 9. Plantas de producción de pelets en Europa.

Existen diferentes tecnologías para optimizar la combustión de este tipo de biocombustibles sólidos.

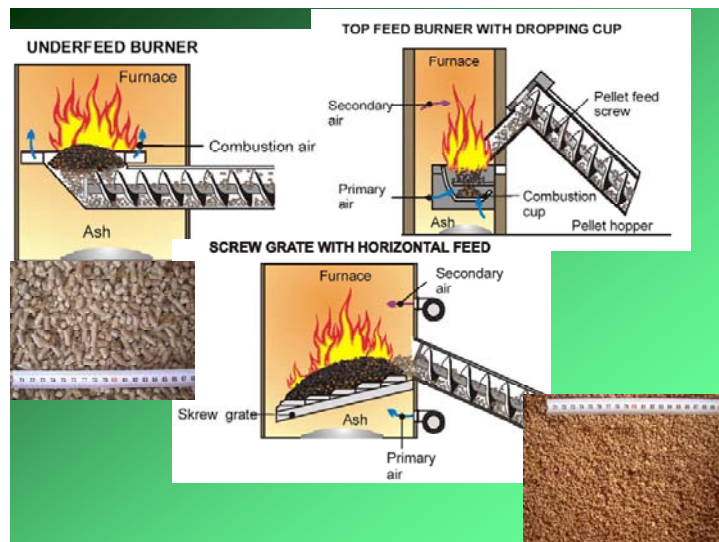


Figura 10. Principales sistemas de combustión en pequeñas instalaciones.

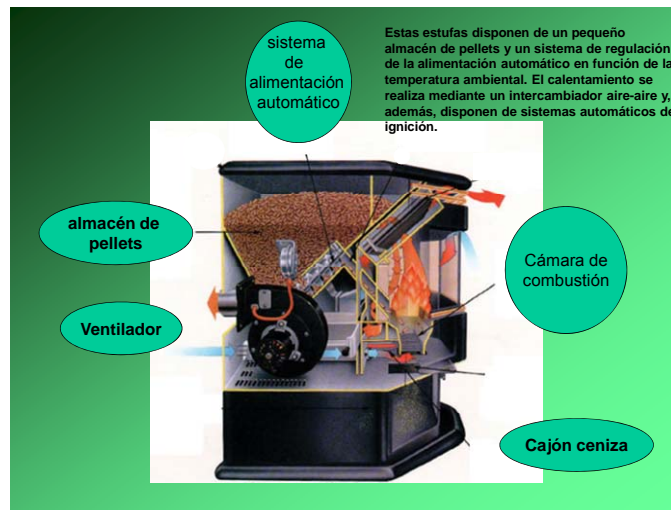


Figura 11. Ejemplo de quemador doméstico de pellets.

Se han desarrollado sistemas de transporte que permiten la carga y descarga de pellets mediante aspiración neumática.

Asimismo, se han desarrollado toda una serie de soluciones específicas para acondicionar salas de calderas y almacenes, sótanos, etc., para el almacenaje del biocombustibles sólidos densificados.



Figura 12. Esquema de soluciones constructivas para almacenaje de pellets.

4 Ejemplo de instalaciones

Las District Heating o centrales de distribución centralizada de energía representan otra importante oportunidad para aprovechar los potenciales

endógenos para producir de forma autónoma y eficiente la energía térmica y distribuirla a comunidades o poblaciones enteras.



Figura 13. District heating alimentadas con biomasa en España. Los costes de instalación de esta tecnología son muy variables y dependen fundamentalmente del número de usuarios y las distancias de suministro en cada caso.

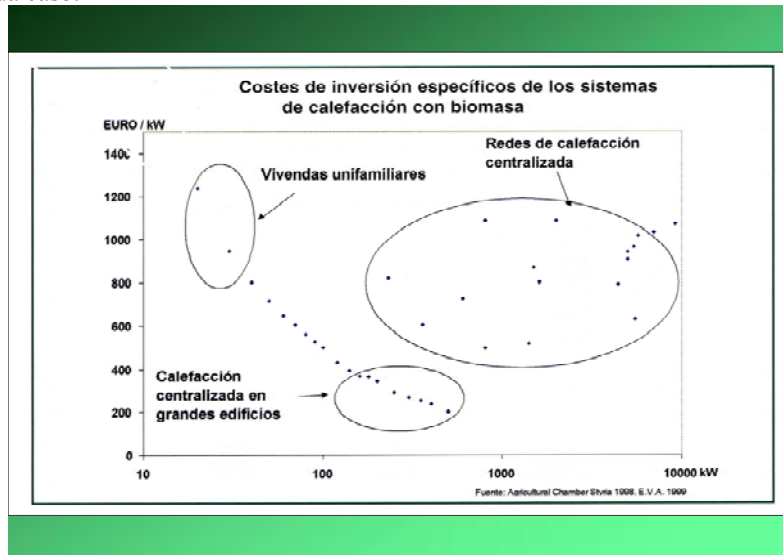


Figura 14. Costes de inversión en sistemas de calefacción con biomasa.

Por todo lo expuesto, entendemos que el aprovechamiento racional de la biomasa es una oportunidad para el desarrollo económico y social de Galicia,

que no podemos permitirnos el lujo de dejar pasar; ya que conviene recordar que Galicia en pleno siglo XXI sigue siendo una Comunidad donde la renta per cápita media es inferior al 75% de la renta media europea, donde uno de cada cinco niños vive bajo el umbral de la pobreza, donde cada año 20.000 jóvenes se ven obligados a emigrar (11.000 de ellos, universitarios).

En el 80% del rural gallego, la mayor empresa que subsiste es la Seguridad Social. Más del 30% de la renta agraria gallega procede de subvenciones directas de la UE.

Por tanto, conviene ser conscientes de que para llegar al concepto de “desarrollo sostenible”, o al de “crecimiento inteligente” lo primero es conseguir el nivel mínimo de desarrollo, que permita garantizar la sostenibilidad futura, ya que sin desarrollo económico no puede haber nada sostenible en el mundo que nos ha tocado vivir y no se puede seguir incentivando la producción de materias y servicios excedentarios, sino productos y servicios con demanda y futuro.

Referencias

Ortiz, L.; Tejeda A.; Vázquez A., 2003. Aprovechamiento de la biomasa residual (Parte III). Rev. CIS MADERA- nº11- 2º semestre 2003

Ortiz L., 2003. Procesos de densificación de la biomasa. Ed. GAMESAL

Ortiz L., 1996. Aprovechamiento energético de la biomasa forestal. Ed. GAMESAL

Ortiz L.; Miguez, JAL., 1995. Energías alternativas y medio ambiente. Vd. GAMESAL

C U R S O S E C O N G R E S O S
Nº 208

En el contexto de un mundo globalizado, el futuro del sistema de abastecimiento energético se verá condicionado por la desaparición de la actual configuración de grandes productores que abastecen a un conjunto diversificado de consumidores. El sistema del futuro se concibe como grandes redes de vehiculación de energía a las que se conectan productores y consumidores que aportan energía o la consumen pudiendo, en cada caso, ser productor o consumidor según sus propios requerimientos. En una línea marcadamente prospectiva, esta obra, y el curso que le ha dado origen, es buena prueba del extraordinario interés que actualmente toman los temas de microgeneración de energía, ya sea puramente eléctrica, puramente térmica y, más aún, la microcogeneración de energías térmica y eléctrica.