



# **Planta de producción de butan-2-ona por deshidrogenación de butan-2-ol**



Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

Universidade de Santiago de Compostela

Escola Técnica Superior de Enxeñaría

Septiembre 2017

Pablo Otero Jorge

# Índice General

## Documento I: Memoria

Anexo I: Balances de materia y Energía

Anexo II: Cálculos Justificativos

Anexo III: Viabilidad Económica

Anexo IV: Fichas de Seguridad

## Documento II: Planos

Plano de localización

Plano de implantación

Diagrama de Flujo

P&ID

Plano de detalle del equipo

## Documento III: Estudios con Entidad Propia

Estudio de Impacto Ambiental

Estudio de Seguridad y Salud en la Obra

## Documento IV: Pliego de Condiciones

## Documento V: Presupuesto



Planta de Producción de Butan-2-ona

# **DOCUMENTO I**

## **Memoria**

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

*Universidade de Santiago de Compostela*

*Escola Técnica Superior de Enxeñaría*

Septiembre 2017

Pablo Otero Jorge

## Índice

1. Objeto.....	6
2. Justificación.....	7
3. Introducción.....	8
3.1. Generalidades.....	8
3.2. Propiedades físicas.....	8
3.3. Propiedades químicas.....	9
3.4. Propiedades termodinámicas.....	10
3.5. Propiedades fisiológicas: efectos en la salud.....	11
3.6. Aplicaciones de la butan-2-ona.....	11
3.7. Estudio de mercado.....	13
3.7.1. Antecedentes.....	13
3.7.2. Actualidad.....	14
3.7.3. Proyección futura.....	19
3.7.4. Principales productores.....	19
4. Emplazamiento.....	21
5. Estudio de las alternativas de producción:.....	23
5.1. Deshidrogenación catalítica de 2-butanol en fase vapor.....	23
5.2. Oxidación directa de n-butenos. Proceso Hoechst-Wacker.....	24
5.3. Oxidación en fase líquida de n-Butano.....	25
5.4. Producción mediante bioprocesos.....	25
5.5. Otros.....	26
6. Descripción del proceso.....	28
6.1. Capacidad de producción de la planta.....	28
6.2. Materias primas.....	28
6.2.1. Butan-2-ol.....	28
6.3. Productos.....	29
6.3.1. Butan-2-ona.....	29

6.4.	Subproductos .....	30
6.4.1.	Hidrógeno.....	30
6.5.	Utilidades.....	31
6.5.1.	Electricidad.....	31
6.5.2.	Vapor .....	31
6.5.3.	Agua desmineralizada .....	31
6.5.4.	Agua de uso general.....	32
6.5.5.	Agua de refrigeración.....	32
6.5.6.	Aceite térmico .....	32
6.5.7.	Gas natural .....	32
6.5.8.	Gas inerte .....	32
6.5.9.	Aire comprimido.....	32
6.6.	Diagrama de bloques.....	33
6.7.	Química del proceso: mecanismo de catálisis y cinética .....	34
6.8.	Descripción detallada del proceso .....	37
7.	Descripción de la instalación .....	39
7.1.	Zonas de la planta .....	39
7.1.1.	Zona de oficinas y aparcamiento .....	39
7.1.2.	Zonas de almacenamiento de materias primas y productos .....	39
7.1.3.	Zona de utilidades .....	39
7.1.4.	Batería de proceso .....	39
7.1.5.	Sala de control y laboratorios de análisis.....	39
7.2.	Descripción de equipos .....	40
7.2.1.	Columna de destilación T-102.....	40
7.2.2.	Condensador E-106 .....	40
7.2.3.	Caldera E-105 .....	40
7.2.4.	Reactor R-101.....	40
7.2.5.	Torre de absorción T-101 .....	40

7.2.6.	Intercambiador de calor E-101.....	41
7.2.7.	Intercambiador de calor E-102.....	41
7.2.8.	Intercambiador de calor E-103.....	41
7.2.9.	Intercambiador de calor E-104.....	41
7.2.10.	Separador líquido vapor V-101 .....	41
8.	Control e Instrumentación .....	42
8.1.	Introducción .....	42
8.2.	Elementos del sistema de control.....	43
8.2.1.	Sensor .....	43
8.2.2.	Transmisor.....	43
8.2.3.	Controlador .....	43
8.2.4.	Elemento final .....	43
8.3.	Elementos de seguridad.....	43
8.3.1.	Alarmas.....	44
8.3.2.	Dispositivos de alivio .....	44
8.4.	Simbología.....	45
8.4.1.	Señales.....	45
8.4.2.	Válvulas y actuadores.....	46
8.4.3.	Instrumentación .....	46
8.5.	Estrategias y algoritmos de control.....	47
8.6.	Elementos en el proceso .....	49
8.6.1.	Torre de absorción T-101 .....	49
8.6.2.	Reactor R-101.....	50
8.6.3.	Intercambiadores de calor .....	50
8.6.4.	Torre de destilación T-102 .....	51
8.6.5.	Alarmas.....	52
9.	Legislación y normativa de aplicación.....	54
9.1.	Legislación relativa a la seguridad industrial.....	54

9.1.1.	Legislación europea.....	54
9.1.2.	Legislación nacional.....	54
9.2.	Legislación relativa a la seguridad e higiene laboral .....	55
9.2.1.	Legislación europea.....	55
9.2.2.	Legislación nacional.....	55
9.3.	Legislación medioambiental.....	56
9.3.1.	Legislación europea.....	56
9.3.2.	Legislación nacional.....	56
9.4.	Legislación relativa a la fase de obra.....	57
9.4.1.	Legislación nacional.....	57
9.5.	Normas técnicas y códigos de diseño .....	58
9.5.1.	Recipientes a presión .....	58
9.5.2.	Intercambiadores de calor .....	58
10.	Seguridad en el diseño y en la operación.....	59
10.1.	Clasificación de las sustancias y la instalación .....	59
10.1.1.	Legislación .....	59
10.1.2.	Caracterización de las sustancias según CE nº 1272/2008.....	60
10.1.3.	Clasificación de la instalación según RD 840/2015 .....	62
10.1.4.	Etiquetado CLP y NFPA.....	63
10.2.	Estudio básico de reactividad.....	65
10.3.	Identificación simple de escenarios de accidente.....	67
10.4.	Índice DOW .....	69
10.5.	Distancias de seguridad.....	74

## **1. Objeto**

El presente proyecto tiene como objeto el diseño de una planta de producción de 2-butanona, en adelante MEK, por deshidrogenación de 2-butanol, en adelante SBA. El diseño se ha realizado para una producción de 20.000 t/año en régimen de operación continuo, con un periodo de operación anual de 330 días al año. Se realiza un estudio de viabilidad técnica y económica, centrado en el diseño riguroso de la columna de destilación para la purificación de la butan-2-ona.

El peticionario del proyecto es el Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Compostela. El proyecto constituye el Trabajo de Fin de Grado de Pablo Otero Jorge, con el que opta al título de Graduado en Ingeniería Química.

## **2. Justificación**

La elección del proceso viene motivada por el interés industrial y comercial del producto, 2-butanona, utilizado como disolvente en una gran variedad de recubrimientos como resinas y lacas, y para la fabricación de adhesivos, tintas y productos de limpieza. Es un producto clave en industrias especialmente relevantes para la economía gallega y española, como los sectores de la automoción y la construcción, donde se utilizan gran variedad de productos que tienen como base la butan-2-ona.

Se ha seleccionado como alternativa de producción la deshidrogenación catalítica de butan-2-ol, al tratarse de un proceso consolidado en su implantación industrial y que permite obtener buenos rendimientos con unas condiciones de operación poco agresivas. La selección de la alternativa de producción se trata de forma detallada en los apartados 3.7 y 5 de la presente memoria.

### 3. Introducción

#### 3.1. Generalidades

La butan-2-ona o 2-butanona, también denominada metil etil cetona o MEK por sus siglas en inglés (Methyl Ethyl Ketone) es un compuesto volátil, inflamable y químicamente estable. Presenta unas excelentes propiedades como disolvente, ya que es miscible con la gran mayoría de disolventes orgánicos, y su volatilidad permite una rápida evaporación. Por ello cuenta con gran aplicación como base para la preparación de resinas, pinturas y lacas; así como en la producción de adhesivos, tintas y agentes limpiadores y desengrasantes.

La 2-butanona es la segunda cetona en longitud de la cadena de carbonos, por encima de la acetona.

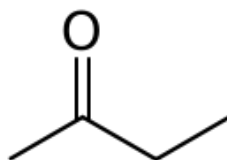


Figura 1 - Estructura molecular de la 2-butanona

En la tabla 1 se muestra la clasificación de la 2-butanona, así como su estado, color y olor en condiciones de laboratorio.

Tabla 1 - Clasificación general de la 2-butanona

<b>Nomenclatura IUPAC</b>	Butan-2-ona
<b>Número CAS</b>	78-93-3
<b>Fórmula Molecular</b>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O
<b>Estado</b>	líquido
<b>Color</b>	Incoloro
<b>Olor</b>	dulce

#### 3.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas significativas se detallan en la tabla 2.

Tabla 2 - Propiedades físicas de la butan-2-ona (los valores son a 20°C a menos que se indique) [1; 2]

<b>Pm (g/mol)</b>	72,11
<b>Punto fusión (°C)</b>	-86,9
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	804,5
<b><math>n_D</math></b>	1,3788
<b>T<sub>crítica</sub> (°C)</b>	262
<b>P<sub>crítica</sub> (kPa)</b>	415

<b>Viscosidad dinámica (mPa s)</b>	0.323
<b>Tensión superficial (mN/m)</b>	24,6
<b>Constante dieléctrica</b>	18,51
<b>Conductividad eléctrica (S/m)</b>	$5 \times 10^{-8}$
<b>Momento dipolar (Debye)</b>	2,74
<b>Presión vapor (mmHg)</b>	80,21

Se trata de un compuesto miscible con la gran mayoría de disolventes orgánicos pero parcialmente inmiscible con el agua, lo cual es significativo en el proceso de producción, por lo que se presenta la solubilidad en agua a 20°C en la tabla 3.

Tabla 3 - Solubilidad de la mezcla butan-2-ona/agua [1]

<b>Solubilidad a 20°C:</b>	
<b>MEK en agua, % peso</b>	27,5
<b>Agua en MEK, % peso</b>	12,5

En la tabla 4 se presentan los azeótropos formados con los disolventes más significativos.

Tabla 4 - Azeótropos para la butan-2-ona [1]

<b>Componente</b>	<b>% peso MEK</b>	<b>T<sub>ebullición</sub> (°C)</b>
<b>Agua</b>	88,7	73,4
<b>Benceno</b>	37,5	78,4
<b>Metanol</b>	30	63,5
<b>Etanol</b>	60,9	74
<b>Ciclohexano</b>	40	72
<b>n-hexano</b>	29,5	64,3

### 3.3. Propiedades químicas

En condiciones normales y ausencia de oxígeno es estable, pero en presencia de oxígeno acaba generando peróxidos tras periodos largos de exposición. También es estable frente a la exposición a la luz, descomponiéndose solo tras largos periodos de exposición a luz ultravioleta. [1]

La química de la butan-2-ona está centrada en torno al grupo carbonilo y los átomos de hidrogeno adyacentes a los extremos de la cadena de carbono. Puede participar en la mayoría de las reacciones comunes para compuestos orgánicos: condensación y autocondensación, halogenación, oxidación y peroxidación, y amonólisis. Se detallan algunas de las reacciones más significativas a continuación. [3]

La oxidación directa genera diacetil (2,3-butenodiona), utilizado como aroma en productos alimentarios como margarinas, mantequillas y bebidas alcohólicas. La reacción con peróxido de hidrógeno genera un precursor inestable que se descompone a una mezcla de peróxidos e hidroperóxidos, entre los que destaca el 2'-dibutil peróxido, presente en un 45% en la mezcla. Los peróxidos de butan-2-ona tienen amplia aplicación como iniciadores de la polimerización de resinas de poliéster a temperatura ambiente. La oxidación con oxidantes fuertes como el ácido nítrico produce una mezcla de ácidos metanóico y propanóico. [1; 3]

La autocondensación de la butan-2-ona genera 5-metil-heptan-3-ona, por la deshidratación de una hidroxiacetona inestable intermedia. Es de mayor interés la condensación con aldehídos en medio básico, especialmente la reacción con formaldehído, que genera 3-metilbutan-2-ona, un compuesto intermedio en síntesis de compuestos farmacéuticos y fragancias. Otras reacciones de condensación de interés ocurren con amoníaco, generando butan-2-amina, un fungicida, y con ésteres alifáticos para producir dicetonas, con aplicación como intermediarios en síntesis específicas de compuestos farmacéuticos, tintes y fragancias. [2; 3]

### 3.4. Propiedades termodinámicas

Se presentan las principales propiedades termodinámicas para la butan-2-ona en la tabla 5.

Tabla 5 - Propiedades termodinámicas de la butan-2-ona [1]

<b>Cp (J/mol K), 23,8 °C</b>	160,8
<b>Calor de fusión (J/mol)</b>	7456
<b>Calor evaporación (kJ/mol)</b>	31,2
<b>Entalpía de combustión (kJ/mol), 25 °C</b>	2444,3
<b>Conductividad térmica (W/m K)</b>	0,145
<b>Punto Flash (°C)</b>	-1
<b>Límite inflamabilidad inferior (%vol. en aire)</b>	1,8
<b>Límite inflamabilidad superior (%vol. en aire)</b>	11,5
<b>Temperatura de autoignición (°C)</b>	505

Se observa que se trata de un compuesto inflamable, que forma mezclas inflamables en contacto con el aire.

### 3.5. Propiedades fisiológicas: efectos en la salud

La butan-2-ona no está considerada como un compuesto tóxico, ni genera efectos tóxicos por bioacumulación. No se reportan efectos graves inmunológicos, neurológicos, genotóxicos o cancerígenos en las concentraciones esperadas en la actividad industrial o en lugares contaminados, a través de las vías de las vías de exposición comunes [4].

Sin embargo, sí que se reportan efectos sistémicos debidos a exposición por vía inhalatoria y dérmica: La butan-2-ona es irritante en las vías respiratorias a partir de concentraciones de 100 ppm (irritación ligera), que comienza a empeorar en el entorno de las 300 ppm. Además, es moderadamente irritante en contacto con la mucosa ocular, y la exposición crónica por vía dérmica puede causar dermatitis. [4]

El INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo) indica los valores límites en el ambiente de trabajo, que garantizan la seguridad de la mayoría de los trabajadores a la butan-2-ona, tanto para la exposición diaria (VLA-ED) como para la exposición de corta duración (VLA-EC), ambas por vía respiratoria. Además, también indica el valor límite biológico (VLB) para el indicador biológico butan-2-ona en orina, de 2 mg/L, que permite evaluar la exposición global (tabla 6). [5]

Tabla 6 - Valores límite ambientales para la butan-2-ona [5]

Valor	ppm	mg/m <sup>3</sup>
VLA-ED	200	600
VLA-EC	300	900

### 3.6. Aplicaciones de la butan-2-ona

La principal aplicación de la butan-2-ona es la utilización como disolvente para recubrimientos de celulosa, acrílicos y vinílicos, ya que su alta solubilidad permite formular productos con alto contenido en sólidos sin afectar a la viscosidad y las propiedades de película. Además, debido a su baja densidad permite obtener grandes volúmenes de producto con cantidades de disolvente inferior a otros compuestos más pesados. [6] Las lacas producidas con butan-2-ona presentan una amplia utilización en las industrias de la automoción, aparatos eléctricos y muebles. También tiene importancia como disolvente en sistemas de resinas, como poliésteres y epoxis.

Debido a su rápida velocidad de evaporación, también encuentra aplicación como disolvente en gran cantidad de adhesivos, incluyendo adhesivos de alta prestaciones y resistentes a aceites y adhesivos activados por calor. También se utiliza como disolvente en selladores industriales, basados en poliuretano, goma de nitrilo y neopreno; que se utilizan como recubrimientos para suelos. [3]

Otra aplicación de importancia es la de disolvente en los procesos de polimerización de poliestireno, acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y *styrene butadiene rubber* (SBR). También se utilizan los peróxidos de butan-2-ona para la polimerización de resinas de poliéster usadas en la fabricación de fibra de vidrio reforzada. [6]

También se utiliza como base para tintas de impresión y señalización de tráfico, así como agente de extracción para compuestos como parafinas, aceites, grasas y resinas, con aplicación en el desparafinado y desulfuración de aceites para su reciclado. De forma similar, se utiliza como agente de limpieza para la retirada pinturas, lacas y barnices, y para el desengrasado de motores y piezas metálicas. [3]

Como materia prima para la producción de otros compuestos su uso es más limitado, restringido a síntesis complejas de productos específicos, pero encuentra aplicación en la producción de compuestos farmacéuticos, cosméticos, fungicidas, y germicidas. Como ejemplo, la industria cosmética utiliza la reacción con citral, un terpenoide (3,7-dimetil-2,6-octadienal), para producir compuestos aromáticos. [1]

### 3.7. Estudio de mercado

#### 3.7.1. Antecedentes

El mercado de la butan-2-ona creció rápidamente a finales de los años 60 hasta convertirse en producto de alto volumen de producción. En la figura se muestra la evolución del volumen de producción en los Estados Unidos desde mediados de los años 60, hasta comienzos de los 80:

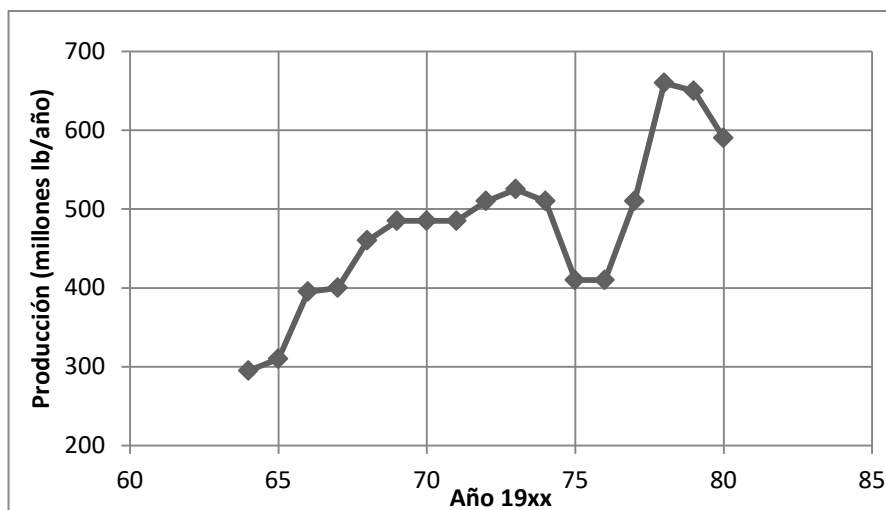


Figura 2 - Producción de MEK en los Estados Unidos (1964-1980) [3]

A principios de los 80 se presentaba la distribución de producción por regiones indicada en la tabla 7.

Tabla 7 - Distribución geográfica de la producción de MEK en 1979 [1]

	U.S.	Europa	Resto América	Asia y Oceanía	Africa
<b>Volumen (kT/año)</b>	315	184	34	100	9

La producción en los Estados Unidos en la década de los 80 decayó hasta alcanzar las 228 kT/año en 1989, fundamentalmente debido a la inclusión de la butan-2-ona en la lista de contaminantes atmosféricos de la agencia de protección del medioambiente estadounidense (*Environmental Protection Agency, EPA*), y la mejora de los procesos de recuperación y reciclado de disolventes. Por el contrario, los otros dos mercados más importantes, Europa y Asia, experimentaron un marcado crecimiento que se refleja en los niveles de producción de 1992, detallados en la tabla 8. [2]

Tabla 8 - Distribución geográfica de la producción de MEK en 1992 [2]

	U.S	Europa	Asia
<b>Volumen (kT/año)</b>	244,9	335	260

Los usos a principios y finales de los años 80 son muy similares entre sí, destacando, como se indicó en el apartado anterior, el uso como disolvente en recubrimientos y adhesivos (figuras 3 y 4)

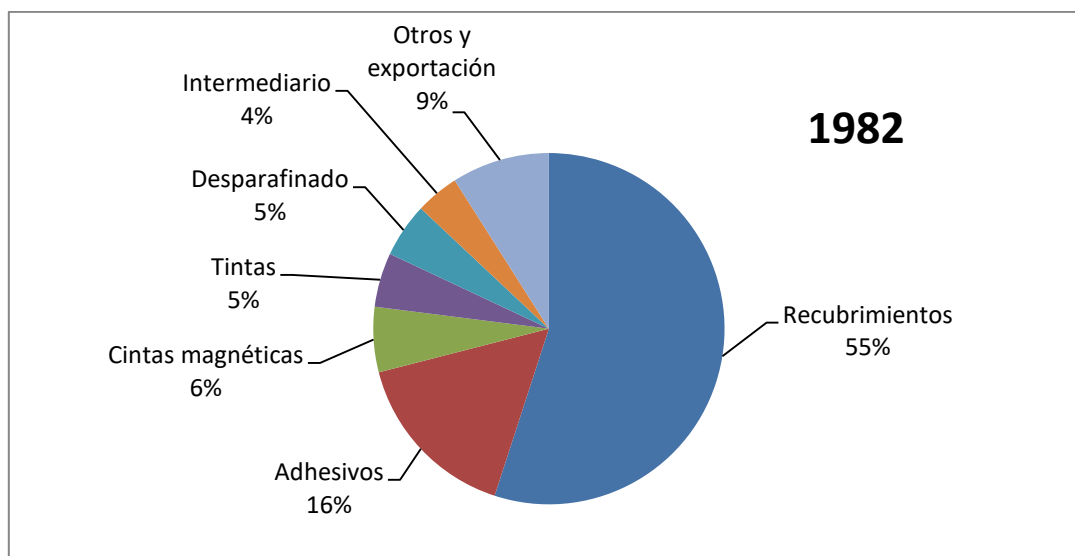


Figura 3 - Distribución porcentual de los usos de MEK en 1982, Estados Unidos [3]

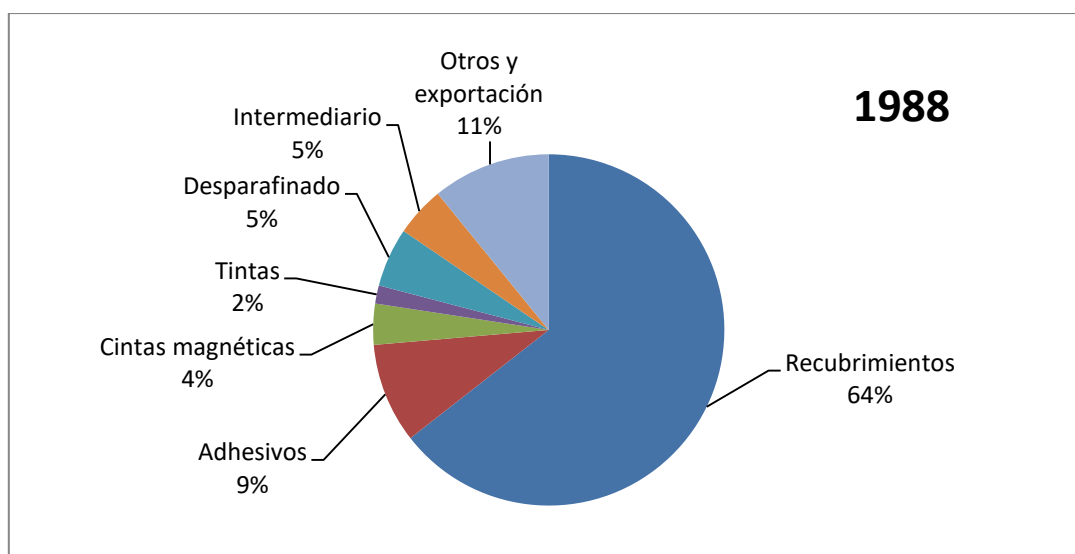


Figura 4 - Distribución porcentual de los usos de MEK en 1988, Estados Unidos [2]

### 3.7.2. Actualidad

Durante los primeros años del siglo 21 el mercado de la butan-2-ona siguió patrones similares a los mostrados en los años 90, con fuerte crecimiento en la región asiática, y un crecimiento estancado en Europa y los Estados Unidos, limitado por la regulación medioambiental.

En 2005, la EPA retira la butan-2-ona de la lista de contaminantes atmosféricos peligrosos, o HAPs (*Hazardous Air Pollutant*), relajando las restricciones regulatorias y creando un escenario más favorable para su uso. Sin embargo, el comienzo de la crisis económica afectó significativamente a la industria automovilística y al sector de la construcción, claves para el consumo de pinturas, resinas y recubrimientos, con el consiguiente efecto negativo sobre la demanda de butan-2-ona en Europa y Estados Unidos, especialmente en torno a los años 2008 y 2009. El impacto fue menor sobre la demanda en los países de la zona de Asia-Pacífico, donde el crecimiento del sector se mantuvo estable. [6]

Pasado el año 2009, durante la recuperación económica, el sector global experimentó un ligero crecimiento, motivado por el desarrollo en las regiones asiáticas, mientras que en Europa y Estados Unidos permanecía estancado. Así, en el 2013 el sector alcanzaba el volumen global de 1320 kilotoneladas, con unos ingresos de 2400 millones de dólares. [7]

Al comparar la distribución geográfica de la producción en 2012 y 2013 se observa el crecimiento moderado en Europa y Estados Unidos, que tienden a recuperar los valores previos a la crisis económica, y el marcado incremento en la región asiática, tabla 9.

**Tabla 9 – Distribución geográfica de la producción de MEK, 2012 y 2013 [7]**

	<b>U.S</b>	<b>Europa</b>	<b>Asia</b>	<b>Resto</b>
<b>Volumen (kT/año) 2012</b>	238,0	211,6	705,1	113,8
<b>Volumen (kT/año) 2013</b>	246,3	218,5	736,2	118,2

Comparando con los valores en el año 1992 indicados en la tabla 8, se observa el estancamiento en el mercado estadounidense, y el fuerte efecto negativo del incremento de la regulación y la crisis económica sobre el mercado europeo. También se observa la explosión del mercado asiático, multiplicando la producción por prácticamente 3.

La distribución por usos en el año 2013 se mantiene similar a la presentada para los años 80, donde la mayoría de la demanda se debe al uso como disolvente en recubrimientos. Las principales diferencias son el aumento del uso como disolvente en pinturas, y la práctica desaparición del uso en la producción de cintas magnéticas. [7]

Analizando el mercado global de importaciones y exportaciones, se observa que Europa, a pesar de ser la tercera región con mayor producción, se posiciona como el principal exportador de butan-2-ona, seguida de cerca por la región asiática. Destaca también Sudáfrica, con un alto volumen de exportación, como se observa en la figura 5.

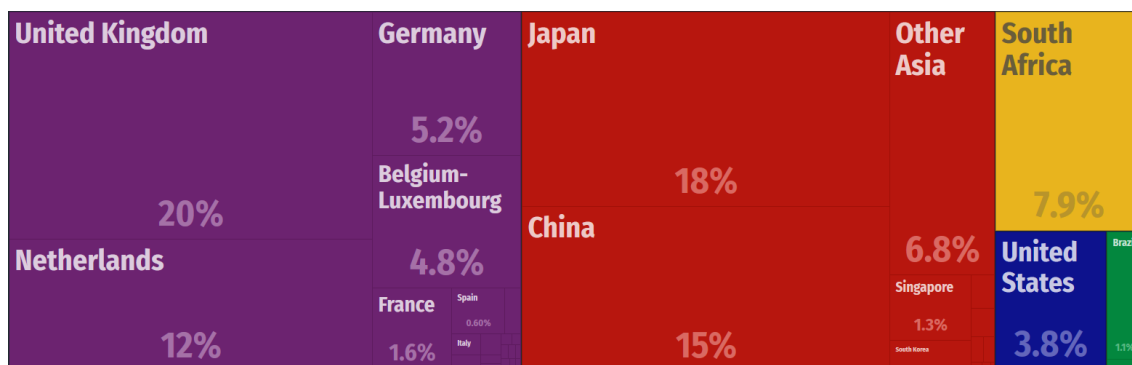


Figura 5 - Distribución geográfica de las exportaciones de MEK en 2015 [8]

En el gráfico de importaciones, figura 6, se observa la importancia del mercado asiático, especialmente de países en desarrollo como India, Vietnam o Indonesia. También destaca el gran volumen de importación a los Estados Unidos, cuya producción nacional no alcanza a cubrir la demanda doméstica.

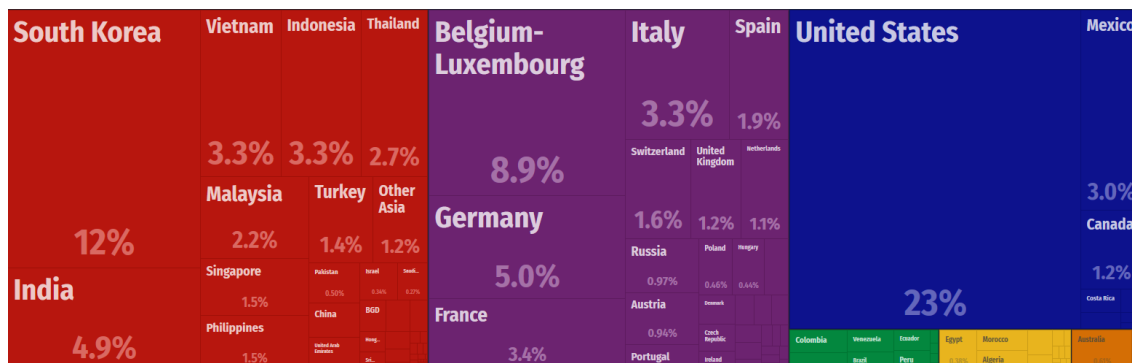


Figura 6 - Distribución geográfica de las importaciones de MEK en 2015 [8]

Ampliando el análisis para el mercado europeo, se evalúan los flujos de importación y exportación de butan-2-ona para el conjunto de los 28 países de la unión con el resto del mundo, del año 2004 al 2016, en las figuras 7 y 8.

En el período estudiado, destacan Brasil, China y Sudáfrica como los tres países originarios del mayor volumen de importaciones a la unión, seguidos muy de cerca por Taiwán y los Estados Unidos. Se puede observar que el total importado es fluctuante, siendo prácticamente nulo en años concretos.

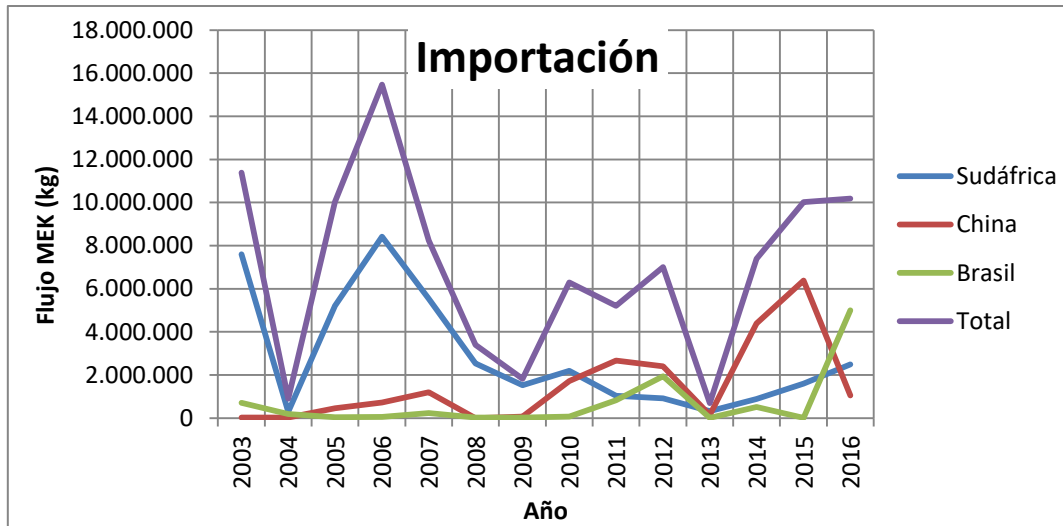


Figura 7 - Evolución de las importaciones de MEK a la U.E. del 2004 al 2016 [9]

El total exportado anualmente es mucho más regular, donde destacan Estados Unidos, Suiza y Rusia como principales receptores de butan-2-ona producida en la unión, seguidos de cerca por Singapur y Turquía. Se observa que mientras las exportaciones a Rusia aumentan significativamente a partir del año 2009, el mercado estadounidense tiende a la baja, lo que se refleja en la tendencia global.

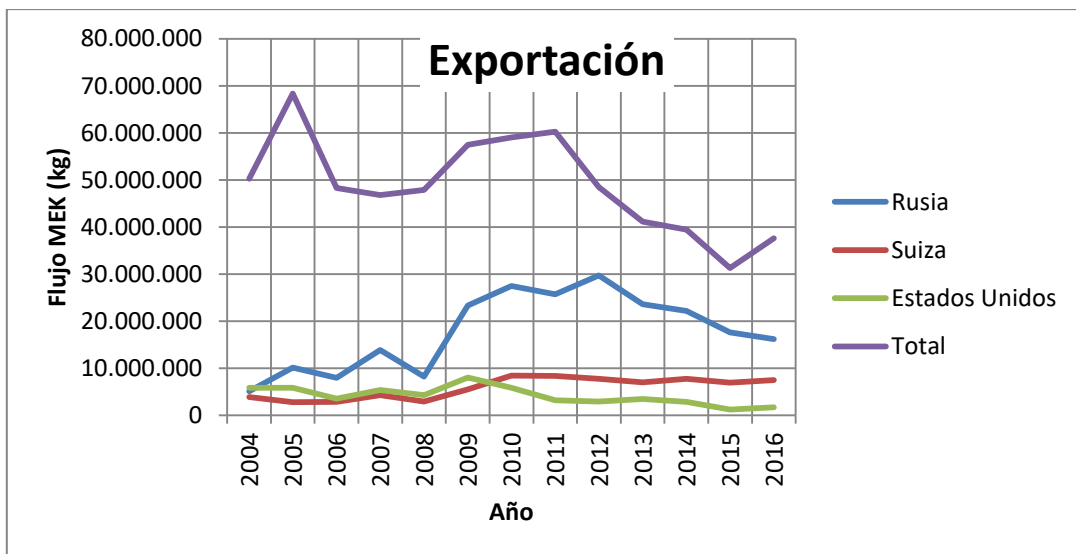
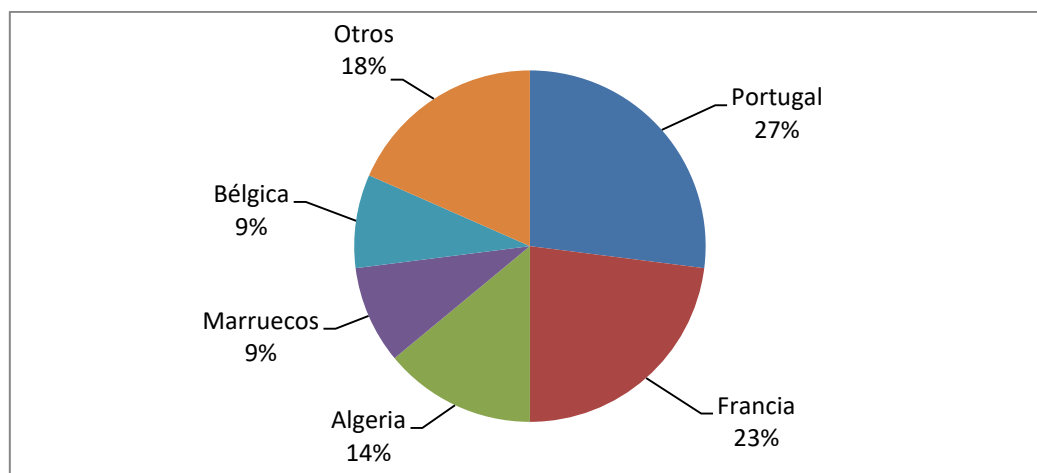


Figura 8 - Evolución de las exportaciones de MEK desde la U.E. del 2004 al 2016 [9]

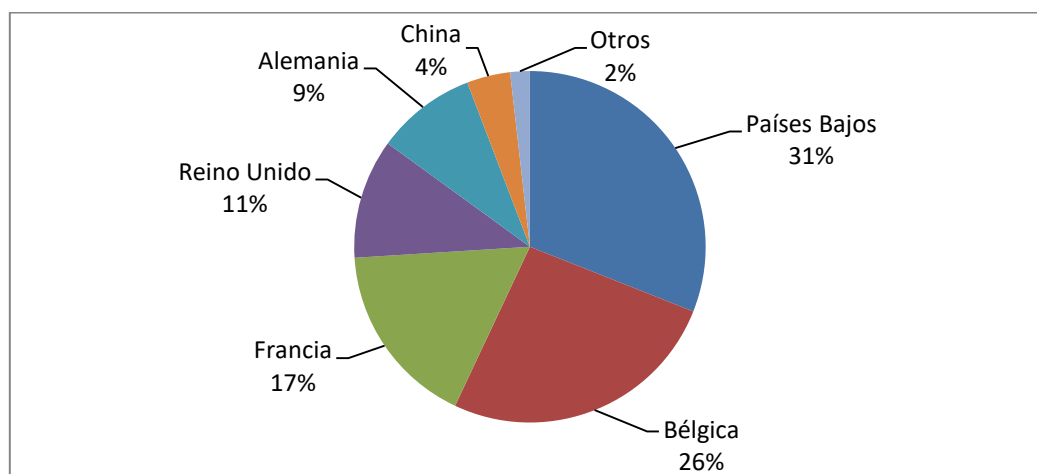
Por último se evalúa el mercado español. España es fundamentalmente un país importador de butan-2-ona, siendo el valor total de las importaciones en el 2015 de 13,1 millones de dólares, que suponen un 1,9% del total importado mundial, frente a los 4,22 millones de dólares de valor de las importaciones, que representa únicamente un 0,60% del total mundial. [8]

Para el año 2015, los principales países receptores de las exportaciones de butan-2-ona española fueron Portugal, Francia, Algeria y Marruecos. La distribución porcentual se muestra en la figura 9.



**Figura 9 - Distribución geográfica de las exportaciones españolas de MEK, 2015 [8]**

En cuanto a las importaciones a España, la práctica totalidad provienen de países comunitarios, copando en torno al 94% del total. Del 6% restante, la gran mayoría procede del mercado asiático, concretamente de China, como se indica en la figura 10.



**Figura 10 - Distribución geográfica de las importaciones españolas de MEK, 2015 [8]**

Debe existir, por tanto, un nicho en el mercado a cubrir mediante la explotación de planta objeto de este trabajo, aunque probablemente haya que dar salida a parte de la producción como exportación fuera de España, fundamentalmente a los países comunitarios vecinos que reciben el mayor flujo actual de exportación.

### **3.7.3. Proyección futura**

Continuando con la tendencia actual, se espera un gran desarrollo del mercado asiático de butan-2-ona en los próximos años, que permita al mercado global alcanzar las 2110 kilotoneladas en 2024. [10]

El crecimiento viene motivado fundamentalmente por el consumo de adhesivos, pinturas y recubrimientos en la industria automovilística y en el sector de la construcción, donde se espera un gran aumento de la inversión gubernamental por parte de países como India y China. De forma similar, se espera un aumento del consumo de estos productos en países de Oriente Medio y Sudamérica. [10]

Además, se espera un incremento del uso de la butan-2ona como intermediario en síntesis complejas, especialmente en las industrias farmacéuticas y de cuidado personal, donde se utiliza para la producción de fungicidas, anestésicos, lociones y medicamentos. El crecimiento viene motivado por el aumento del gasto en sanidad en los países asiáticos, y la demanda de productos específicos en los mercados europeos y norteamericanos. [10]

### **3.7.4. Principales productores**

A nivel global, los principales productores de butan-2-ona son:

- Exxon Mobil/ Exxon Chemical: Es la mayor empresa del sector petroquímico que cotiza en bolsa, con sede en Estado Unidos. Posee dos plantas de producción de butan-2-ona, la primera en Batton Rouge en el estado de Luisiana, Estados Unidos, con una capacidad de 135 kilotoneladas anuales; y una segunda en Fawley, al sur del condado de Hampshire en Gran Bretaña, con una capacidad idéntica a la de Batton Rouge. [11]
- Maruzen Petrochemical: Es una de las mayores empresas petroquímicas Japonesas, siendo la butan-2-ona uno de sus principales productos, junto con el etileno y el propileno. Su planta de producción de butan-2-ona está localizada en Ichihara, en la prefectura de Chiba, Japón. Se trata de una de las plantas con mayor capacidad de producción del mundo, con un tope 170 kilotoneladas anuales. [12]
- Tasco Chemical: Se trata de una empresa taiwanesa especializada en la química de compuestos orgánicos de 4 carbonos. Posee una planta de producción de butan-2-ona en la ciudad de Lin Yuan, Taiwán, con una capacidad de 120 kilotoneladas anuales. [11]
- Tonen Chemical: Empresa de la industria química Japonesa, parte del grupo Tonen General Sekiyu, con una planta de producción en Kawasaki, Japón, con una capacidad de 90 kilotoneladas anuales. [11]

Otros productores relevantes a nivel global incluyen a Sasol (Sudáfrica) con 55 kilotoneladas anuales, SK Corp (Corea del Sur), con 50 kilotoneladas anuales, y multitud de empresas chinas con plantas de producciones variables entre las 5 y las 40 kilotoneladas. [11]

A nivel europeo, los principales productores están localizados en los Países Bajos y Alemania:

- Shell Chemical: División petroquímica de la multinacional del sector del petróleo y el gas, Shell. Su producción de butan-2-ona tienen lugar en el complejo petroquímico de Pernis, Rotterdam (Países Bajos), con una capacidad de 90 kilotoneladas anuales. [11]
- Sasol Solvents: Parte del grupo Ineos Enterprises desde la adquisición completada a finales de 2014. La producción tiene lugar en una planta especializada en disolventes oxigenados localizada en Moers, Alemania, con una capacidad de 70 kilotoneladas anuales. [11]

#### 4. Emplazamiento

La planta de producción de butan-2-ona se va a emplazar en el parque de Actividades Económicas de Arteixo (ACTECA), también conocido como Polígono Industrial de Morás. Estuvo paralizado desde la primera oferta de venta de parcelas en 2012, pero recientemente la Xunta de Galicia ha decidido reactivar la inversión para finalizar la urbanización del 75% de la superficie. [13]

Situado en Arteixo, cerca de la ciudad de Coruña, se encuentra a tan solo 8 km del puerto exterior y cuenta con una superficie total de 1.479.762 m<sup>2</sup>. [14]



**Figura 11 - Localización del polígono (elaboración propia)**

Se sitúa al este de Arteixo, con comunicación directa con la autopista radial A-6 Coruña-Madrid, y la autopista AG-55 que comunica con el puerto exterior y la ciudad de Coruña. Su situación se presenta resaltada en azul en la figura 11.

El emplazamiento en un polígono industrial permite el acceso a una serie de servicios y utilidades, que en el caso del polígono seleccionado son: [15]

- Electricidad de baja y media tensión
- Abastecimiento de agua
- Saneamiento de aguas pluviales y fecales
- Redes de telefonía y alumbrado público
- Gas natural

La parcela seleccionada cuenta con una superficie de 17.400 m<sup>2</sup> y se encuentra situada en la zona centro del polígono. El acceso se realiza desde una vía interna del polígono, situada en la cara este de la parcela, que comunica directamente con la salida a las autopistas mencionadas.

Se muestra a continuación un plano del polígono, con la parcela señalada en azul en la figura 12.



**Figura 12 - Plano del polígono de Morás [14]**

El emplazamiento se ha seleccionado fundamentalmente atendiendo a dos factores:

- Comunicaciones: El polígono industrial de Morás se sitúa a apenas 8 km del puerto exterior de Coruña, que permite la recepción y envío de mercancías por buque. Además, se encuentra directamente comunicado con la ciudad de A Coruña por un tramo de tan solo 15 kilómetros de autopista, y con Madrid, a través de la autopista radial A-6.
- Zona industrial: El polígono de Morás se encuentra situado en una zona de alta concentración de Industria, con los polígonos de Sabón, Vío y Pocomaco a unos pocos kilómetros. Además, se encuentra cercano a la refinería de Repsol en A Coruña, que a pesar de no producir directamente 2-butanol, cuenta con una unidad de ETBE/MTBE de 57.000 toneladas anuales de capacidad de la que se obtiene una corriente de refinado de butenos que se puede utilizar para la producción de 2-butanol.

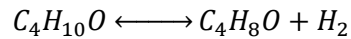
## 5. Estudio de las alternativas de producción:

Se presentan a continuación los principales procesos utilizados a escala industrial para la producción de butan-2-ona. Se presenta una descripción sencilla del proceso seleccionado, a desarrollar en apartados anteriores, acompañado del resto de procesos existentes en la industria.

### 5.1. Deshidrogenación catalítica de 2-butanol en fase vapor

Será la alternativa seleccionada para desarrollar en el presente proyecto, ya que se trata de la alternativa con mayor uso dentro de la industria, debido a su sencillez tanto en los requerimientos de equipamiento de proceso, como de las condiciones de operación.

Se trata de una reacción endotérmica ( $\Delta H^\circ = 51 \text{ kJ/mol}$ ) en fase gaseosa llevada a cabo en un reactor catalítico de lecho fijo multitubular. La reacción, de equilibrio, es la siguiente:



El equilibrio se describe en la fuente [16] mediante la ecuación 1, alcanzándose la máxima concentración de butan-2-ona en torno a los 300 °C:

$$\log K_p = -2,790 * T^{-1} + 1,51 * \log T + 1,865 \quad (1)$$

La reacción tiene lugar sobre catalizadores de óxido de zinc, cobre, latón o bronce. Las condiciones de operación varían según el catalizador, pero se trabaja a presiones atmosféricas o cercanas y temperaturas entre los 250 °C y los 400 °C, alcanzándose conversiones en el entorno del 90%, y con una presencia despreciable de reacciones secundarias. El mecanismo de catálisis y las condiciones óptimas se discutirán en profundidad en la descripción detallada del proceso.

En la figura 13 se muestra el diagrama de flujo más simple para una planta de producción de butan-2-ona por deshidrogenación catalítica en fase vapor.

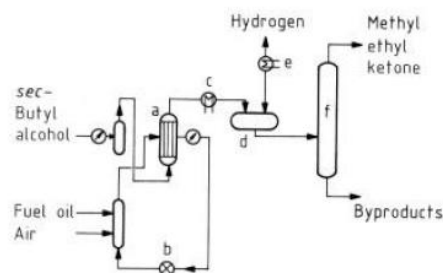


Figura 13 - Diagrama de flujo simplificado para la deshidrogenación catalítica en fase vapor de butan-2-ol [1]

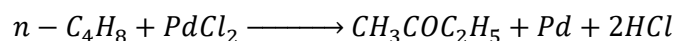
El proceso de deshidrogenación comienza por vaporizar el butan-2-ol, que se alimenta al reactor catalítico para su deshidrogenación. Al tratarse de una reacción endotérmica, el reactor catalítico requiere un aporte de energía, que en el caso del diagrama de la figura 13 se realiza mediante un circuito cerrado de aceite térmico.

La corriente efluente del reactor, compuesta principalmente por butan-2-ona, hidrógeno y butan-2-ol no reaccionado, se condensa para separar dos corrientes, una compuesta mayoritariamente por hidrógeno, y una segunda corriente líquida formada por butan-2-ona y butan-2-ol, que se envía a una columna de destilación en la que se obtiene una corriente de butan-2-ona a las especificaciones de pureza deseadas.

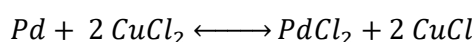
Como se puede observar, se trata de un proceso sencillo, que no requiere unas condiciones de operación complejas, y que permite obtener una buena conversión.

### 5.2. Oxidación directa de n-butenos. Proceso Hoechst-Wacker

Se lleva a cabo la oxidación directa de n-butenos en fase homogénea acuosa con presencia de una pareja sales redox, concretamente cloruros de paladio y cobre ( $PdCl_2/CuCl$ ). La química del proceso consta de la reacción principal de oxidación de los n-butenos a acetona, con la consiguiente reducción de la sal de paladio: [1]



Y la reoxidación de la sal de paladio mediante el siguiente equilibrio redox:



El proceso alcanza altas conversiones, de entorno al 95%, con la siguiente distribución de selectividad:

Tabla 10 - Distribución de productos en el proceso de oxidación directa [1]

Producto	Selectividad (%)
Butan-2-ona	86
n-Butyraldehido	4
Productos clorados	6
Dióxido de carbono	1

Como se puede observar, el proceso alcanza un buen rendimiento y una selectividad favorable para el producto deseado, pero presenta una serie de inconvenientes que complican su implantación a nivel industrial, fundamentalmente: [2]

- Purificación: las butanonas cloradas y el butiraldehído dificultan significativamente la purificación de la butan-2-ona, complicando la secuencia de separación. Esto genera mayores costes y reduce el potencial económico del proceso.
- Corrosión: la presencia de ácido libre y de compuestos clorados en la disolución acuosa genera un ambiente altamente corrosivo, por lo que se requiere equipamiento fabricado en materiales especiales como titanio, disparando el coste de la instalación.

### **5.3. Oxidación en fase líquida de n-Butano**

La butan-2-ona se puede obtener como subproducto en el proceso de obtención de ácido acético por oxidación en fase líquida de n-butano.

La reacción de autoxidación tiene lugar a través de un mecanismo de reacción radicalario complejo, en el que la butan-2-ona es un producto intermedio y el ácido acético es un producto final. El proceso puede ser catalítico, utilizando acetatos de cobalto y sodio como catalizadores homogéneos en la fase líquida, que permiten obtener un ratio másico de butan-2-ona y ácido acético de 0,4 a 1 operando a 160 °C y 5,7 MPa. También existe la variante no catalítica, llevada a cabo en reactores de flujo en pistón con tiempos de residencia de en torno a los 3 minutos, donde a unas condiciones similares a las del proceso catalítico de presión y temperatura se obtienen ratios másicos de butan-2-ona y ácido acético de hasta 3 a 1. [1]

A mediados del siglo 20, este era el proceso principal para la obtención de ácido acético, pero ha sido abandonado de forma progresiva desde los años 80 en favor de la carbonilación de metanol, por lo que en la actualidad es un método que apenas se utiliza para la producción de butan-2-ona. [2]

Una de las pocas plantas que mantenían la producción de butan-2-ona por este proceso, concretamente por oxidación catalítica [1], es de la empresa Celanese en Pampa, Texas (Estados Unidos), con una capacidad de 40 kilotoneladas anuales. La producción se detuvo de forma permanente en 2009. [17]

### **5.4. Producción mediante bioprocesos**

La necesidad de obtener combustibles y productos químicos de forma sostenible, y limitar la dependencia del petróleo está impulsando la investigación en procesos de conversión biológica de recursos naturales. En este contexto se enmarca la investigación para la producción de butan-2-ona a partir de la fermentación de biomasa. Aunque la investigación está en sus fases iniciales, sin una alternativa clara para su implementación a escala industrial, destacan dos de ellas:

- Alternativa híbrida bioquímica/catalítica:

Consistente en una primera etapa en la que se obtiene un producto de fermentación de materia orgánica que posteriormente se transforma catalíticamente al producto deseado. El principal interés de esta alternativa radica en que los procesos de fermentación están bien estudiados y proporcionan buenos rendimientos, que al combinarlos con métodos clásicos de catálisis y purificación propios de la industria química crean un proceso económicamente atractivo.

En el caso de la butan-2-ona, el producto de fermentación típico es el butano-2,3-diol, que se deshidrata sobre un catalizador sólido ácido para obtener butan-2-ona. [18]

- Alternativa bioquímica:

Comienza de forma similar a la alternativa híbrida, obteniendo un producto de fermentación a partir de materia orgánica, pero en este caso la transformación al producto de interés se realiza también de forma biológica, por medio de enzimas y cofactores expresados por organismos modificados genéticamente.

El principal interés es integrar todo el proceso de producción, utilizando un único microorganismo para la fermentación y la transformación final, pero conlleva la dificultad añadida de tener que diseñar un microorganismo eficaz en ambas etapas.

A mayores, el proceso de transformación enzimática es más lento y complejo que el de transformación catalítica y obliga a trabajar en discontinuo, aunque generalmente alcanza una buena selectividad.

El producto de fermentación es el mismo que el de la alternativa híbrida, butano-2,3-diol, que se deshidrata a 2-butanona por acción de una deshidratasa B-12 dependiente producida por bacterias modificadas, como la *E. coli*. [19]

### 5.5. Otros

Existen otros procesos que no son atractivos económicamente, bien por las condiciones de reacción o purificación, la materia prima requerida, los rendimientos, u otros factores, pero que resulta de interés mencionar, entre los que destacan: [1]

- La separación catalítica del sec-butilbencenhidroperóxido para producir fenol y butan-2-ona; mediante un catalizador ácido.
- Autoxidación de butan-2-ol en fase líquida, para producir butan-2-ona y peróxido de hidrogeno.
- Oxidación catalítica de n-butenos en fase gaseosa.

## Documento I: Memoria

Por último, mencionar la producción simultánea de estireno, n-butanol y butan-2-ona mediante la oxidación de n-butenos con hidroperóxido de benceno a óxidos de butileno, que se hidratan posteriormente. Tiene un atractivo económico moderado, pero se descarta en el contexto del proyecto al tratarse de un proceso complejo, en el cual la butan-2-ona solo es uno de los productos principales.

## 6. Descripción del proceso

### 6.1. Capacidad de producción de la planta

La planta de butan-2-ona está diseñada para la producción de 20.000 toneladas anuales en régimen de operación continuo a lo largo de 330 días. Los días restantes están destinados paradas para mantenimiento, limpieza de equipos, cambios de catalizador y revisiones pertinentes.

### 6.2. Materias primas

#### 6.2.1. Butan-2-ol

Se trata de un alcohol alifático saturado, concretamente uno de los isómeros del butanol. Es el alcohol más corto que presenta un carbono asimétrico. A temperatura ambiente se encuentra como un líquido incoloro con un olor característico, cuyos vapores son irritantes para las mucosas, y tienen efectos narcóticos a altas concentraciones. Prácticamente toda la producción de butan-2-ol se destina a la transformación de butan-2-ona, aunque encuentra uso como disolvente dada su capacidad de solubilizar disolventes orgánicos, agua e hidrocarburos. Las mezclas con compuestos aromáticos se utilizan como disolventes en algunos tipos de resinas y lacas, y por si solo se utiliza en la fabricación de perfumes, esencias o agentes surfactantes. [20]

Las principales propiedades del butan-2-ol se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 - Propiedades del butan-2-ol (los valores mostrados son a 20 °C a menos que se indique) [20]

Pm (g/mol)	74,11
Punto fusión (°C)	-114,7
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,8065
$n_D$	1,3972
Viscosidad dinámica (mPa s) a 15 °C	4,2
Tensión superficial (mN/m)	23,5
Solubilidad en agua (%peso)	12,5
Solubilidad del agua en 2-butanol (%peso) a 30 °C	36,5
Punto flash (°C)	24
Límite inflamabilidad inferior (%vol. en aire)	1,7
Límite inflamabilidad superior (%vol. en aire)	9,8
Temperatura autoignición (°C)	390

El 2-butanol se produce a escala industrial por la hidratación de 1 y 2-buteno, que puede ser indirecta o directa.

En el proceso de hidratación indirecta se transforma una corriente con una fracción de butenos variable, desde el 30 % hasta más del 90%, según procedan de un proceso de *steam-cracking* o de corrientes ricas en fracción C4 de la refinería. Se trabaja en fase líquida, a temperaturas de entre 25 y 75 °C, presiones de 7 atmósferas, y altas concentraciones de ácido sulfúrico (en torno al 85%). El proceso de purificación es complejo y no se va a describir, pero permite obtener butan-2-ol de alta pureza, que se puede comercializar o destinar directamente a producción de butan-2-ona. [3]

El proceso de oxidación directa opera con corrientes de alta pureza de n-butenos, generalmente corrientes de refinado del proceso de producción de MTBE (Metil Tert-Butil Eter), que se combina con una corriente de n-butenos frescos. Se opera a temperaturas de entre 140 y 170 °C y presiones de 60-80 atm, en un reactor con resinas de intercambio iónico o catalizadores de óxido de tungsteno. Las principales ventajas de la oxidación directa son una alta selectividad, menor impacto ambiental, y menores costes de mantenimiento, pero se ve lastrado por la baja conversión si la corriente de alimentación no tiene una alta concentración de n-butenos. Sin embargo, con un proceso de preconcentración de la alimentación, el proceso se vuelve atractivo. El 2-butanol obtenido tiene una alta pureza, con concentraciones de agua de aproximadamente un 0,03% en agua, especificación que se va a utilizar para el diseño del proceso. [3]

### **6.3. Productos**

#### **6.3.1. Butan-2-ona**

Se trata del producto principal de la instalación objeto del proyecto. Sus principales características se hayan recogidas en el apartado 3 del presente documento.

Se realiza la producción de butan-2-ona de alta pureza, a una especificación del 99,7% de pureza en peso, conforme a los estándares internacionales para comercialización, como indica la fuente bibliográfica [1].

El almacenamiento se realiza en tanques de acero inoxidable, recomendados para el almacenamiento prolongado. Se debe controlar la formación de peróxidos y la presencia de agua, al tratarse de un compuesto higroscópico. Se va utilizar nitrógeno para inertizar los tanques de almacenamiento y evitar el contacto con el aire.

## 6.4. Subproductos

### 6.4.1. Hidrógeno

Como subproducto de la reacción de deshidrogenación se obtienen grandes cantidades de hidrogeno, que se separan por condensación parcial y se tratan en una torre de absorción para retirar de la corriente la butan-2-ona arrastrada. La corriente que se obtiene en el proceso contiene impurezas, pero es posible purificarla para valorizarla como subproducto.

A temperatura ambiente el hidrogeno se encuentra en fase gas, pero se suele almacenar como hidrógeno líquido, a menos que se trate de almacenamiento por periodos inferiores a las 30 horas, en cuyo caso se almacena en fase gas a presión. [21]

Además de tener dos isotopos (deuterio y tritio), el hidrógeno está presente en dos formas según el spin nuclear de ambos átomos en la molécula: orto y para hidrógeno. Ambas formas son inconvertibles, y se encuentran en equilibrio. A continuación se listan las principales propiedades del hidrogeno normal, que se corresponde con la mezcla en equilibrio a temperatura ambiente: [21]

Tabla 12 - Propiedades del n-hidrógeno ( 101,3 kPa y 273,15 K a menos que se indique) [21]

<b>Pm (g/mol)</b>	2,01
<b>T crítica (K)</b>	32,98
<b>P crítica (kPa)</b>	7,3
<b>T ebullición (K) a 1 atm</b>	20,39
<b><math>\rho_v</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,0899
<b>Cp (J/mol K)</b>	28,59
<b>Viscosidad (mPa s)</b>	$8,34 \times 10^{-3}$
<b>Conductividad térmica k (W/m K)</b>	$173,9 \times 10^{-3}$

Tabla 13 - Propiedades relativas a la inflamabilidad [22]

<b>Límite inflamabilidad inferior (%vol. en aire)</b>	4
<b>Límite inflamabilidad superior (%vol. en aire)</b>	77
<b>Temperatura autoignición (°C)</b>	560

El hidrógeno tiene valor como subproducto dada la gran variedad de aplicaciones que tiene en la industria química. La mayor parte del consumo mundial de hidrógeno procede de los siguientes procesos:

Producción de amoníaco, fundamentalmente a través del proceso Haber, producción de metanol e hidrocarburos, por síntesis de Fischer-Trops y procesos de hidrotratamiento en refinerías. Sin embargo, la mayoría de estos procesos utilizan hidrógeno producido en la planta, con menos de un 10% del total de hidrógeno producido mundialmente presente en el mercado.

Por ello, la forma más interesante de valorizar el hidrógeno obtenido en la planta de 2-butanona es que está este integrada, o cercana, a un complejo petroquímico o refinería con presencia de los procesos mencionados anteriormente. Adicionalmente, resultaría ideal que dentro del complejo petroquímico se encontrase una sección de producción 2-butanol, que podría estar alimentada por una corriente de butenos procedente de una sección de producción de MTBE. De esta forma se lograría una integración completa de las materias primas y subproductos del proceso de producción de butan-2-ona, maximizando el beneficio.

## **6.5. Utilidades**

Se define como utilidades a aquellos servicios auxiliares requeridos para la operación del proceso. Generalmente se suministran desde un edificio central, situado fuera del límite de batería del proceso.

### **6.5.1. Electricidad**

La electricidad se destina fundamentalmente a la operación de motores, iluminación y otros usos generales como equipos informáticos. Se puede generar en la propia planta, pero la opción preferida es adquirirla de la red eléctrica nacional, contando generalmente con un sistema de apoyo para mantener la operación de la planta en caso de problemas en el abastecimiento.

### **6.5.2. Vapor**

Se genera en una caldera central a partir de agua desmineralizada, para evitar incrustaciones, y se utiliza como agente calefactor en el proceso. En la planta objeto del trabajo, se va a utilizar vapor de baja presión (hasta 2,5 bar), para alimentar la caldera de la columna de destilación y para vaporizar la entrada al reactor y vapor de alta para vaporizar la alimentación al reactor.

### **6.5.3. Agua desmineralizada**

Se purifica sobre resinas de intercambio iónica para suministrar a las calderas, de forma que se evite la precipitación. Como ejemplo se citan los carbonatos, que tienden a precipitar en las zonas calientes del equipamiento de proceso.

#### **6.5.4. Agua de uso general**

Utilizada en las instalaciones del personal (lavabos, duchas, vestuarios), en la limpieza de la planta (mangueras) y en el circuito contra incendios. Se compra al proveedor local a menos que la planta tenga acceso a alguna fuente natural como ríos, pozos o lagos.

#### **6.5.5. Agua de refrigeración**

Refrigerada en torres de tiro natural o inducido, se utiliza en el condensador de la columna de destilación, y en aquellos intercambiadores del proceso destinados al enfriamiento. La temperatura depende del clima en la zona de la instalación, pero los valores típicos se mueven en el entorno de los 25 °C.

#### **6.5.6. Aceite térmico**

Utilizado para proporcionar calefacción al reactor, que lleva a cabo una reacción endotérmica a unos 260°C. El aceite circula por un circuito cerrado, calentándose en una estufa que quema gas natural.

#### **6.5.7. Gas natural**

Se obtiene de la red de distribución, con una toma fuera de la batería de proceso. Se utiliza como combustible para la caldera y el calentamiento del aceite térmico.

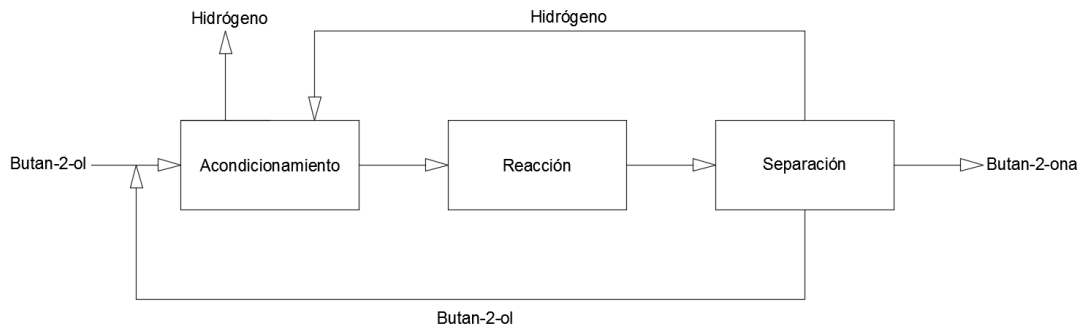
#### **6.5.8. Gas inerte**

Necesario dado que en la planta se trabaja con productos altamente combustibles (butan-2-ona y butanol) y con compuestos sensibles al oxígeno en periodos de exposición prolongada (butan-2-ona). Se utiliza para la purga de tanques, evitando la formación de mezclas explosivas con aire, y para la inertización de los mismos, protegiendo el contenido del oxígeno y el vapor de agua presente en el aire. Generalmente se utiliza nitrógeno.

#### **6.5.9. Aire comprimido**

Se utiliza de forma general en la planta, y de forma específica en instrumentos de control accionados de forma neumática. Se comprime en la propia planta, haciendo uso de compresores de una o dos etapas, generalmente alojados en un edificio separado para aislarlos, al ser una fuente de ruido. El aire a comprimir se debe filtrar y desecar.

## 6.6. Diagrama de bloques



**Figura 14 - Diagrama de bloques del proceso**

El diagrama de bloques del proceso se puede describir de forma sencilla comenzando por la alimentación de butan-2-ol fresco, que se mezcla con la recirculación de butan-2-ol obtenido en la etapa de separación del proceso. Esta corriente de butan-2-ol se utiliza en la etapa de acondicionamiento para recuperar la butan-2-ona presente en la corriente de gases de hidrógeno que se obtiene de la condensación de los gases de reacción en la etapa de separación. Posteriormente pasa a un tren de intercambiadores en el que se vaporiza y se eleva su temperatura hasta la de reacción.

Tras la etapa de reacción, los gases obtenidos se condensan, y como ya se mencionó, la corriente de hidrógeno se envía al pretratamiento para recuperar el producto arrastrado. La corriente líquida procedente de la condensación se envía a una columna de destilación, en la que se obtienen la butan-2-ona a la pureza deseada, y una corriente de butan-2-ol que se recircula.

### 6.7. Química del proceso: mecanismo de catálisis y cinética

El mecanismo y la cinética de reacción fueron descritos por primera vez por Perona y Thodos en 1957 [23] en esferas de catalizador de latón entre los 340 °C y los 400 °C, a presión atmosférica; utilizando el equilibrio descrito por Korb y Burwell [16].

El mecanismo propuesto consta de tres pasos: absorción del alcohol sobre un sitio activo, descomposición del complejo alcohol-sitio activo para formar butan-2-ona en la fase vapor e hidrogeno molecular adsorbido a la superficie del catalizador, y por último la desorción del hidrogeno molecular. La etapa limitante es la desorción del hidrogeno molecular, con las otras dos etapas en equilibrio. La cinética propuesta para el mecanismo es la siguiente:

$$r_A = \frac{C \left[ p_{Ai} - \frac{p_{ki} * p_{hi}}{K} \right]}{p_{ki} * \left[ 1 + K_A * p_{Ai} + K_{AK} * \frac{p_{Ai}}{p_{Ki}} \right]} \quad (2)$$

Dónde:  $r_a$  es la velocidad de reacción en lbmol alcohol/ h ft<sup>2</sup>.

- C es una constante calculada como:

$$\log C = -\frac{10735}{T} + 7,776 \quad (3)$$

- $K_A$  es la constante del equilibrio de absorción de 2 butanol, calculada como:

$$\log K_A = -\frac{6165}{T} + 5,327 \quad (4)$$

- $K_{AK}$  es una constante calculada como:

$$\log K_{AK} = \frac{486}{T} - 0,1968 \quad (5)$$

- $p_{Ai}$ ,  $p_{Ki}$  y  $p_{Hi}$  son las presiones parciales en la interfaz, del alcohol, la cetona y el hidrogeno, respectivamente, en atm.

Tres años más tarde, en 1960, Thaller y Thodos [24] publicaron un artículo en el que se definía la naturaleza dual de la etapa controlante de la reacción de deshidrogenación, evaluando la reacción en un catalizador de latón, a presiones variables de hasta 15 atm y temperaturas de entre 290 °C y 370 °C.

Se proponía una modificación al mecanismo previo, específicamente en la etapa de reacción, donde en lugar de una reacción sobre un solo sitio activo, tiene lugar la reacción entre el complejo sitio activo - molécula de butan-2-ol y otro sitio activo vacante para producir ambos productos adsorbidos sobre la superficie del catalizador en forma molecular.

Se afirma que etapa controlante de la cinética es la reacción superficial en la parte baja del rango de temperaturas, independientemente de la presión. Al aumentar la temperatura, la velocidad de la reacción superficial aumenta más rápidamente que la velocidad de la etapa de desorción, con lo que esta pasa a ser la etapa controlante en todo el rango de presión a partir de los 370 °C. En el rango intermedio de temperaturas, la etapa controlante depende de la presión, predominando la etapa de desorción a presiones altas, al verse desfavorecida, y la etapa de reacción superficial a presiones bajas.

En 1964 Ford y Perlmutter publicaron un artículo [25] estudiando la reacción en un catalizador de latón similar a los de los autores anteriores, ampliando el estudio de Thaller y Todos a un mayor rango de temperaturas (300-450 °C) a la presión de 1 atm.

En él, se plantea no solo un cambio en la etapa controlante en función de la temperatura, sino un cambio en el mecanismo de reacción. Entre los 350 y los 400 °C los autores proponen un mecanismo con los siguientes pasos: adsorción del alcohol, reacción en un único sitio activo produciendo butan-2-ona molecular adsorbida, y desorción de la cetona; siendo la etapa controlante la adsorción del alcohol. La ecuación cinética representativa es la siguiente:

$$r = \frac{C * P_A}{1 + K_k P_k} \quad (6)$$

dónde los términos son análogos a la ecuación 2.

Para aquellas temperaturas inferiores a 350 °C y superiores a 400 °C (dentro de los márgenes del estudio, 300-450 °C), el mecanismo propuesto es similar: adsorción del alcohol, reacción en único sitio activo, esta vez produciendo hidrogeno molecular como producto adsorbido, y desorción del mismo. La ecuación cinética es la siguiente:

$$r = \frac{C * P_A}{1 + K_A * P_A + K_H * P_H} \quad (7)$$

dónde de nuevo los parámetros son análogos a la ecuación 2.

Por último, se hace referencia al artículo publicado por Keuler, Lorenzen y Miachon [26], en el que se analiza la reacción de deshidrogenación sobre catalizadores de cobre soportado por óxido de magnesio u óxido de sílice. Además de los efectos del tipo de soporte, también se estudia el efecto del tamaño de partícula, el porcentaje de cobre y la temperatura. El mecanismo propuesto es con reacción en doble sitio activo, con la cinética controlada por esta misma etapa. La ecuación cinética ajustada para temperaturas de entre 190 y 250 °C es:

$$-r'_a = \frac{8,29 \times 10^5 * e^{-\frac{6903}{T}} * \left( p_A - \frac{p_R p_S}{3,538 \times 10^8 * e^{-7100/T}} \right)}{\left( 1 + 8,804 \times 10^{-5} * e^{\frac{3298}{T}} * p_R \right)^2} \quad (8)$$

dónde los subíndices A,R,S se corresponden con butan-2-ol, butan-2-ona e hidrógeno, respectivamente, las presiones parciales se expresan en kPa, y las temperaturas en K. La velocidad de reacción está en unidades de mol/ kg catalizador h.

El estudio determina como óptimo el catalizador de un 15% de cobre soportado sobre óxido de sílice, en partículas de entre 300-850 µm y a temperaturas cercanas a los 240 °C. En estas condiciones, se evitan las reacciones secundarias de formación de butenos, alcanzando una selectividad del 100%, y una conversión de entorno al 80-90%, según las condiciones concretas de temperatura y relación entre el flujo de alimentación y el peso de catalizador.

Estos datos vienen a confirmar los datos utilizados para el balance de materia en el diseño del proceso, presentes en la fuente [1], donde se citan selectividades de prácticamente el 100% y conversiones de entre el 90 y el 95% para un catalizador de cobre preparado por precipitación; operando a temperaturas de entre 240 y 260 °C a presión atmosférica.

El artículo de Keuler et al. [26] realiza un estudio de desactivación del catalizador, y afirma que es estable a temperaturas de 250°C para un período de operación de 24 h, mientras que se observa desactivación a 310°C, fundamentalmente debida a la formación de coque y a la sinterización del catalizador. La fuente [1] cita una vida del catalizador de entre 3 y 4 meses operando a 260°C, datos concurrentes con los resultados obtenidos por Keuler.

### **6.8. Descripción detallada del proceso**

En el presente apartado se realiza una descripción detallada del proceso en relación al diagrama de flujo incluido en el Documento II, Planos, del presente proyecto.

La materia prima, el butan-2-ol se tienen almacenado en condiciones normales en tanques desde los que se bombea al área de proceso, constituyendo la corriente 1 de butan-2-ol fresco que contiene pequeñas cantidades de agua, y que se mezcla con la corriente 14 de reciclo de butan-2-ol sin reaccionar, que contiene pequeñas cantidades de butan-2-ona. Así se obtiene la corriente 2, formada fundamentalmente por butan-2-ol, y con un pequeño porcentaje de agua y butan-2-ona.

La corriente 2 se alimenta a la torre de absorción T-101, en la que se pone en contacto en contracorriente con la 11, formada fundamentalmente por el hidrógeno obtenido en el reactor que arrastra parte de la butan-2-ona y pequeñas cantidades del resto de los componentes. El objetivo de este contacto en la torre T-101 es eliminar la butan-2-ona arrastrada por el hidrógeno en la corriente 11, para posteriormente purificarla en la columna de destilación.

Así, a la salida de la torre T-101 se obtiene la corriente líquida 3, de composición similar a la corriente 2, pero con la butan-2-ona recuperada, y un pequeño porcentaje de hidrógeno disuelto; y la corriente gaseosa 4, formada fundamentalmente por hidrogeno, y un pequeño arrastre del resto de componentes, especialmente de butan-2-ol. Esta corriente 4 sale del área de proceso, para pasar a una condensación en la que se recupera el butan-2-ol, que se devuelve al almacenamiento, dejando el hidrógeno que se almacena presurizado.

La corriente 3, a 37,63 °C se envía al intercambiador de calor E-101, donde se utiliza la corriente de salida del reactor para precalentarla hasta los 95 °C, momento en el que pasa a identificarse como la corriente 4. La corriente 4 pasa al intercambiador de calor tipo *kettle* E-102, en el que se utiliza vapor de baja presión para vaporizarla por completo, a una temperatura de 98,63 °C, pasando a etiquetarse como corriente 5. La corriente 5 se alimenta al intercambiador E-103, en el que se utiliza vapor de alta presión para elevar su temperatura hasta la temperatura de reacción de 260 °C, pasando a denominarse corriente 6.

La corriente 6 entra al reactor R-101, en el que tiene lugar la reacción catalítica a 260 °C y 1 atm de presión, alcanzando un 90 % de conversión, y sin reacciones secundarias significativas. Los detalles del mecanismo y la cinética que justifican estos valores se encuentran detallados en el apartado anterior (6.6). El reactor recibe el aporte de calor mediante un aceite térmico que circula a través de un circuito cerrado que no se muestra en el diagrama de proceso.

La corriente 7, de productos del reactor, abandona el mismo a la temperatura de reacción de 260 °C, y se dirige como ya se ha mencionado al intercambiador de calor E-101, en el que disminuye su temperatura hasta los 194,77 °C, pasando a denominarse como corriente 8.

La corriente 8 se envía al intercambiador de calor E-104, donde se condensa de forma completa, y se refrigera hasta los 25 °C. De esta forma, se obtiene una corriente bifásica (9), que se envía al separador líquido vapor identificado como V-101, donde se separa por cabezas la corriente 11, que ya se ha descrito anteriormente, compuesta por el hidrógeno formado en la etapa de reacción, y una arrastre especialmente significativo de butan-2-ona. Por fondos se obtiene la corriente 12, compuesta fundamentalmente por butan-2-ona y el butan-2-ol no reaccionado, con pequeñas cantidades de agua, que se comporta como un inerte durante toda la etapa de reacción.

La corriente 12 se alimenta a la columna de destilación, que tiene como objetivo purificar la butan-2-ona hasta las especificaciones comerciales como producto de cabezas, y recuperar el butan-2-ol a una pureza aceptable para su recirculación al comienzo del proceso. Así se obtienen la corriente de cabezas 13, con un 99,7% de pureza en peso de butan-2-ona, siendo el resto todas las impurezas de agua alimentadas a la columna, y una pequeña cantidad de butan-2-ol, a una temperatura de 79,52 °C; y la corriente 14, formada por butan-2-ol y una pequeña cantidad de butan-2-ona, a 99,09 °C. El diseño de la columna de destilación se presenta detallado en el anexo de cálculos justificativos.

La corriente 13, se envía al almacenamiento de producto, donde la butan-2-ona se almacena en tanques inertizados para evitar la formación de peróxidos orgánicos por oxidación en contacto con el aire.

## **7. Descripción de la instalación**

En este apartado se describen las zonas que se delimitan en la parcela de la instalación, así como un listado de los equipos empleados.

### **7.1. Zonas de la planta**

La parcela sobre la que se encuentra la planta cuenta con dos accesos en ambos extremos de la cara adyacente a la vía principal del polígono, y un vial principal que rodea el perímetro de la instalación. El área incluida dentro de este vial externo se delimita en dos zonas, una de producción y otra de oficinas y aparcamiento, separadas por un vial secundario. Se desglosan las zonas listadas a continuación.

#### **7.1.1. Zona de oficinas y aparcamiento**

Se sitúa adyacente al vial principal del polígono, delimitada por los otros extremos por vial que circunvala la instalación y el vial secundario que divide la parcela en dos zonas. El objetivo es separar lo máximo posible al personal de oficina de la zona de proceso, para minimizar el impacto en caso de accidente, y posicionar la zona de aparcamiento lo más próxima posible a uno de los accesos/salidas de la planta, para facilitar la evacuación rápida.

#### **7.1.2. Zonas de almacenamiento de materias primas y productos**

Ambas zonas se encuentran dentro de la zona de producción, adyacentes al vial que rodea la instalación, y próximas a uno de los accesos a la planta, para facilitar las operaciones de carga y descarga por parte de vehículos pesados.

#### **7.1.3. Zona de utilidades**

Adyacente a las zonas de almacenamiento de materias primas y productos, en ella se emplazan los edificios para la generación de utilidades como el vapor, el aire de instrumentación o el agua de refrigeración.

#### **7.1.4. Batería de proceso**

Se trata del mayor área dentro de las delimitadas dentro de la instalación, y se encuentra dentro de la zona de producción, pero con toda la separación posible de las zonas de almacenamiento, y de la zona de oficinas y aparcamiento.

#### **7.1.5. Sala de control y laboratorios de análisis**

La sala de control y los laboratorios de análisis se encuentran en la zona de producción, adyacentes a la zona del proceso, pero las unidades con mayor riesgo se encuentran instaladas los más alejadas posibles de ellos.

## 7.2. Descripción de equipos

### 7.2.1. Columna de destilación T-102

Es la unidad principal del proyecto, de la cual se ha realizado el diseño riguroso presentado en el anexo de cálculos justificativos. Tiene como objetivo la purificación de la butan-2-ona hasta la pureza comercial (99,7 % en peso) y la recuperación del butan-2-ol no reaccionado para su recirculación. Las características más relevantes se presentan en la tabla 14.

Tabla 14 - Características principales de la columna T-102

<b>T cabezas (°C)</b>	79,6
<b>T colas (°C)</b>	98,5
<b>N° platos</b>	42
<b>Altura (m)</b>	31,5
<b>Diámetro (m)</b>	1,43

### 7.2.2. Condensador E-106

Es el condensador total de la columna de destilación T-102. Opera a la temperatura de burbuja del destilado (79,52 °C) calculada según lo expuesto en el anexo de cálculos justificativos, utilizando como fluido refrigerante agua de refrigeración a 25°C.

### 7.2.3. Caldera E-105

La caldera de la columna de destilación T-102, que opera a la temperatura de burbuja de la corriente de colas (99,09 °C), calculada mediante los datos del sistema termodinámico expuestos en el anexo de cálculos justificativos. Opera utilizando vapor de baja presión.

### 7.2.4. Reactor R-101

Es un reactor catalítico de lecho fijo tubular, en el que se lleva a cabo la reacción endotérmica de deshidrogenación de forma isotérmica a 260 °C. Las características del catalizador, el mecanismo y la cinética se describen en el apartado 6.6 de la presente memoria. Se utiliza aceite térmico como fluido calefactor, para evitar tener que alimentar vapor de alta presión al reactor, añadiendo complicaciones en el diseño mecánico del equipo.

### 7.2.5. Torre de absorción T-101

Es una torre de absorción de relleno que tiene como objetivo la recuperación de la buta-2-ona arrastrada en la corriente de hidrógeno condensado. Para ello, se utiliza como disolvente la corriente de alimentación al proceso de butan-2-ol, de forma que se evite añadir al proceso otros componentes que dificulten la secuencia de separación, o que aumentasen el volumen requerido en el reactor R-101.

Se consigue una buena recuperación de la butan-2-ona, aunque hay un pequeño arrastre de butan-2-ol en la corriente de salida de gas de torre, que se recupera posteriormente al refrigerar y condensar la corriente.

#### **7.2.6. Intercambiador de calor E-101**

Tiene como objetivo el aprovechamiento energético de la corriente de gases efluente del reactor, que se encuentra a la temperatura de reacción (260 °C). Se utiliza para precalentar la corriente de butan-2-ol que se va a alimentar el reactor antes de su vaporización, alcanzando una temperatura de 95 °C.

#### **7.2.7. Intercambiador de calor E-102**

Es un intercambiador de calor tipo Kettle en el que se vaporiza por completo la corriente de butan-2-ol que se va a alimentar al reactor. La temperatura de ebullición son 98,08 °C, por lo que se utiliza vapor de baja presión como fluido calefactor.

#### **7.2.8. Intercambiador de calor E-103**

Se utiliza para elevar la temperatura de la corriente gaseosa de butan-2-ol obtenida a 98,08 °C en el intercambiador E-102 hasta la temperatura de reacción para alimentarla al reactor R-101. La temperatura de 260 °C se alcanza utilizando vapor de alta presión.

#### **7.2.9. Intercambiador de calor E-104**

Tiene como objetivo la condensación y enfriamiento hasta 25 °C de la corriente de gases de salida del reactor tras su paso por el intercambiador de calor E-101. Se debe alcanzar esta temperatura para minimizar en lo posible el arrastre de butan-2-ona por parte de la corriente de hidrógeno. Se utiliza agua refrigerada

#### **7.2.10. Separador líquido vapor V-101**

En él se separa la corriente gaseosa de hidrógeno con la butan-2-ona arrastrada que se alimenta a la torre de absorción T-101, y la corriente líquida con la mayor parte de la butan-2-ona producida en el reactor y el butan-2-ol no reaccionado que se envía a la columna de destilación T-102.

## 8. Control e Instrumentación

### 8.1. Introducción

El proceso de producción se diseña para operar según un estado estacionario con el que se alcanzan los objetivos de producción de una forma segura, eficiente y lo más respetuosa con el medio ambiente posible. Sin embargo, durante la operación real, la planta es un sistema dinámico en el que aparecen perturbaciones.

La acción de las perturbaciones sobre el proceso es inherentemente negativa, ya que tenderá a apartar las condiciones en el proceso de las especificaciones para las que fue diseñado, afectando a la calidad del producto, y de forma más grave, a la seguridad del proceso. Por ello, surge la necesidad de introducir un sistema de control que permita contrarrestar las perturbaciones, y mantener el proceso dentro de las especificaciones de diseño.

Este sistema de control se implementa de forma automática y supervisada por operadores humanos. En general, los sistemas de control suelen operar sobre variables sencillas de medir y controlar, que en el caso de la industria química son la presión, el flujo, el nivel y la temperatura. Un sistema de control adecuado cumple con las siguientes funciones: [27]

- **Operación segura:** El proceso se mantiene dentro de las especificaciones de diseño, a las cuales la integridad de los equipos y del proceso en general está asegurada. Adicionalmente, en caso de fallo del sistema de control, otras capas de protección permite detectar situaciones peligrosas, alertando a los operarios por medio de alarmas, y en casos extremos, desactivando de forma segura parte o la totalidad del proceso.
- **Nivel de Producción y Calidad del Producto:** Al mantener el proceso dentro de las especificaciones de diseño, se garantiza alcanzar los niveles de producción y composiciones de producto objetivo.
- **Coste:** El sistema de control mantiene los consumos y rendimientos en el punto óptimo especificado por el diseño. Adicionalmente, al permitir monitorizar el proceso, se obtiene información útil sobre su funcionamiento que puede resultar en mejoras o rediseños que aumenten el beneficio.
- **Emisiones:** El control permitirá detectar y atajar situaciones con riesgo para el medio ambiente, como fugas, derrames, u otros escenarios de accidente. Adicionalmente, la monitorización del proceso permite garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental.

## **8.2. Elementos del sistema de control**

Un sistema de control típico está formado por los siguientes elementos:

### **8.2.1. Sensor**

El primero de los elementos del lazo de control, se encarga de medir la variable a controlar, o una variable de la que esta dependa de forma directa. Los sensores se suelen utilizar para medir presión (manómetros, células de presión diferencial), nivel (flotadores, medidores ultrasónicos), temperatura (termopares, RTDs), y flujo (platos de orificio, magnéticos). Ocasionalmente, se utilizan analizadores de composición en línea.

### **8.2.2. Transmisor**

Elemento secundario que traduce y envía la señal generada por el sensor al siguiente elemento del lazo. Generalmente se suelen usar señales neumáticas, eléctricas de baja intensidad (4-20 mA) o electrónicas.

### **8.2.3. Controlador**

Es el elemento que recibe la señal del transmisor y calcula la acción de control, al compararla con el valor establecido (*set point*). Las plantas actuales suele controlarse por medio de DCS (*Distributed Control System*), que son sistemas de control digital que permiten a los operadores monitorizar y controlar la totalidad de la planta desde la sala de control.

### **8.2.4. Elemento final**

Ejecuta la acción de control sobre el proceso. Los elementos finales típicos en la industria química son las válvulas de control (generalmente de diafragma), actuadas de forma neumática. La válvula de control realiza la acción de control regulando un caudal de material o de energía en el proceso.

También se puede utilizar válvulas actuadas de forma eléctrica, para tuberías de gran diámetro, bombas de velocidad variable u otros elementos como resistencias, motores etc.

## **8.3. Elementos de seguridad**

Sobre la capa de protección que representa el sistema de control, se sitúan el conjunto de válvulas de alivio, y el sistema de seguridad funcional, dentro del que se incluye el conjunto de las alarmas.

### **8.3.1. Alarmas**

Las alarmas generalmente se utilizan para monitorizar variables críticas para la operación segura de la instalación, como pueden ser la temperatura en un reactor exotérmico, la presión en un vaporizador o el nivel de líquido en fondos de una columna. Cuando las variables monitorizadas alcanzan un grado de desviación predeterminado, sea por encima o por debajo del valor normal, se activa la alarma correspondiente.

Las alarmas son independientes del sistema de control básico, y al activarse muestran algún tipo de aviso sonoro y/o luminoso en la sala de control, de forma que alerten a los operadores de una situación de riesgo. Es necesario establecer un protocolo de actuación para cada una de las alarmas, que los operadores deben conocer para poder gestionar de forma adecuada las emergencias.

Asociado con el sistema de alarmas, se encuentra el sistema de seguridad funcional, que define los enclavamientos, encargándose de desactivar, o mover a un estado de operación seguro parte o la totalidad de la instalación ante situaciones de emergencia. En el presente proyecto no se va a realizar el diseño o análisis del sistema de seguridad funcional, al tratarse de un trabajo académico de grado, pero es necesario mencionarlo, y debería ser estudiado en fases más avanzadas del desarrollo del proyecto.

### **8.3.2. Dispositivos de alivio**

Se trata de dispositivos actuados por la presión estática en su entrada, diseñados para abrirse durante una emergencia, cuando las condiciones del proceso se encuentren alejadas de los valores de diseño. Generalmente, tienen como objetivo evitar el aumento del valor de la presión en el interior de un equipo por encima de un cierto margen con respecto al valor de diseño; aunque también pueden utilizarse para prevenir un exceso de vacío. [28]

Los tipos principales son las válvulas de alivio, diseñadas para abrirse, eliminar el exceso de presión, y volver a cerrarse al alcanzar condiciones seguras; y los discos de ruptura, que consisten en un diafragma, generalmente metálico, que se rompe de forma controlada cuando al alcanzarse una presión determinada en el interior del equipo. Ambos dispositivos se pueden instalar de forma combinada si las condiciones del proceso lo aconsejan. [29]

En concreto, la instalación combinada de ambos dispositivos se utiliza para contrarrestar los inconvenientes de los dos tipos, y los modos de montaje comunes son: [29]

- **Disco de ruptura en serie, aguas arriba de la válvula de alivio:** se utiliza para proteger a la válvula de alivio de condiciones agresivas en el proceso, para evitar la pérdida total de contención tras el estallido del disco de ruptura, y para asegurar la estanqueidad de la válvula de alivio.
- **Disco de ruptura en serie, aguas debajo de la válvula de alivio:** Menos común, se utiliza en casos en los que la válvula está conectada a un sistema colector con condiciones agresivas que puedan afectar a la integridad de la misma.
- **Discos de ruptura en serie, aguas arriba y debajo de la válvula de alivio:** Es la combinación más inusual, se utiliza en caso de que haya condiciones agresivas tanto a la entrada como a la salida de la válvula de alivio, y sea imprescindible protegerla para asegurar su integridad.

No se va a realizar el dimensionado de los dispositivos de alivio ya que en el presente proyecto todas las unidades operan a presiones atmosféricas, o muy cercanas.


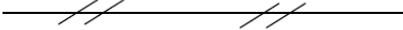

#### 8.4. Simbología

La simbología y nomenclatura más común para la representación e identificación de los sistemas de control es la propuesta por la *International Society of Automation* o ISA, que se introduce a continuación.

##### 8.4.1. Señales

En la tabla 15 se introducen los principales tipos de señales y su representación en un diagrama.

Tabla 15 - Tipos de señal









Señal	Representación
Conexión a proceso	
Señal neumática	
Señal eléctrica o binaria	

Los distintos tipos de señal se encuentran estandarizados. Las señales eléctricas suelen transmitirse entre los 4 y los 20 mA de intensidad, las señales neumáticas en el rango de los 3 y los 6 psig, y las señales binarias según diversos protocolos de comunicación que pueden ser propietarios, pertenecientes a una empresa concreta, o de código abierto.

### 8.4.2. Válvulas y actuadores

La representación de los distintos tipos de válvulas y actuadores también se encuentra estandarizada, como se muestra en la tabla 16:



Tabla 16 - Tipos de válvulas y actuadores

Válvula/Actuador	Representación
Válvula genérica	
Válvula de bola	
Válvula de globo	
Válvula manual	
Actuador genérico (muelle-diafragma)	
Pistón lineal	
Motor	
Solenoide	

### 8.4.3. Instrumentación

Los elementos de los lazos de control se identifican mediante los símbolos presentados en la tabla 17:

Tabla 17 - Tipos de instrumentos

Señal	Representación
Instrumento montado en campo	
Instrumento en panel de control	

Los instrumentos se identifican mediante una etiqueta formada por hasta tres letras y 3 números, del tipo TIC-103. Los números identifican el lazo al que pertenece al instrumento, mientras que las letras identifican el tipo y función del instrumento. Cada una de las letras que se pueden utilizar denota un significado distinto según se encuentren en la primera posición, o en posiciones sucesivas, como se muestra en la tabla 18. La etiqueta se incluye dentro del símbolo de instrumentación, con las letras en la parte superior, y el lazo en la parte inferior.

Tabla 18 - Letras de identificación de instrumentación

Letra	Primeras letras		Letras sucesivas		
	Variable medida	Modificador de variable	Lectura/función pasiva	Salida/Función activa	Modificador función
A	Análisis		Alarma		
B	Combustión		Def. Usuario	Def. Usuario	Def. Usuario
C	Def. Usuario			Controlador	Cerrar
D	Def. Usuario	Diferencial			Desviación
E	Voltaje		Sensor		
F	Flujo	Ratio			
G	Def. Usuario		Visor		
H	Manual				Alto
I	Corriente		Indicador		
J	Potencia	Muestreo			
K	Tiempo	Velocidad de cambio		Estación de control	
L	Nivel		Luz		Bajo
M	Def. Usuario				Intermedio
N	Def. Usuario		Def. Usuario	Def. Usuario	Def. Usuario
O	Def. Usuario		Orificio		Abierto
P	Presión		Puntual		
Q	Cantidad	Integral	Integral		
R	Radiación		Registrador		
S	Velocidad	Seguridad		Interruptor	Detener
T	Temperatura			Trasmisor	
U	Multivariable		Multifunción	Multifunción	
V	Vibración			Válvula, amortiguador	
W	Peso, Fuerza		Pozo		
X	No clasificado	Eje X	No clasf.	No clasf.	No clasf.
Y	Estado	Eje Y		Dispositivo auxiliar	
Z	Posición, dimensión	Eje Z		Actuador, elemento final	

### 8.5. Estrategias y algoritmos de control

Uno de las estrategias simples de control es el control *feedback*, en el que se realiza una medida de alguna de las variables del proceso aguas abajo del equipo a controlar, que se envía al controlador, que calcula la acción de control y la envía al elemento final, generalmente una válvula, que estará situada aguas arriba del equipo a controlar. Los lazos empleados en el presente proyecto siguen esta configuración, pero existen otras estrategias de control más complejas, como el control en cascada o *feedforward*, o técnicas aún más avanzadas como el control predictivo o adaptativo.

En los lazos de control *feedback* la acción de control se suele calcular mediante una combinación de acciones Proporcional, Integral y Derivativa, o algoritmo PID. El control puede realizarse utilizando simultáneamente los tres tipos de acción, solo con la acción proporcional y la integral, o solo con la proporcional, según el tipo de proceso a controlar y el comportamiento deseado del lazo de control.

A continuación se incluye una breve descripción del efecto de cada una de las tres acciones de control: [30]

- **Acción proporcional:** Generalmente actúa evitando las oscilaciones en la variable controlada, pero no tiene por qué devolver la variable al *set point*. La acción correctora se calcula multiplicando una ganancia por el error entre el valor de la variable y el *set point*. Proporciona una respuesta rápida, aumentando su velocidad al aumentar la ganancia.
- **Acción Integral:** La acción integral tiende a eliminar de forma completa el error en la variable controlada. La acción se calcula como el producto del inverso del tiempo integral por la integral del error. Reduce la velocidad de la respuesta del controlador al combinarse con otro tipo de acción.
- **Acción derivativa:** La acción derivativa aumenta la respuesta del controlador, al anticipar la dirección y la velocidad del cambio del proceso. Se calcula como el producto de la derivada temporal del error por el tiempo diferencial. No es recomendable cuando la señal proporcionada al controlador presenta un alto nivel de ruido.

Los principales lazos de control, según la variable controlada, son: [30]

- **Lazos de control de flujo:** Los procesos de flujo responden de forma rápida a la acción de control, y la medición del flujo es por naturaleza ruidosa, por lo que se suele utilizar acción proporcional-integral.
- **Lazos de presión de gas/líquido:** Ambos tienen características muy similares, en los lazos de control de presión en líquidos se suele utilizar acción proporcional-integral o únicamente integral, mientras que en los lazos de control de gas se utiliza únicamente la acción proporcional.
- **Lazos de nivel:** Se puede utilizar únicamente acción proporcional, siempre que el proceso concreto presente una alta capacitancia y bajo tiempo muerto, y sea aceptable un cierto error de offset sobre el nivel.

- **Lazo de temperatura:** Comúnmente se utiliza acción proporcional-integral o el conjunto completo PID. En el caso del control de reactores exotérmicos, se deben considerar el uso de estrategias de control avanzadas para mejorar las condiciones de seguridad.

## 8.6. Elementos en el proceso

A continuación se procede a la identificación y descripción de los lazos presentes en el proceso, agrupando aquellos que afectan a la misma unidad y describiendo su función y componentes.

### 8.6.1. Torre de absorción T-101

Los lazos presentados para el control de la torre de absorción T-101 son los siguientes:

- **Lazo de presión 101:**

Dado que en la columna de absorción tiene lugar el contacto entre una corriente gaseosa ascendente de líquido y otra descendente, cabe la posibilidad de que la presión dentro del equipo varíe, saliéndose de las especificaciones de producción. Por ello, se instala el lazo 101 que regula la salida de gas de la columna, aumentándola en caso de aumento de presión. Los instrumentos del lazo 101 se listan en la tabla 19.

Tabla 19 - Elementos del lazo 101

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-101
Controlador-Indicador de presión	PIC-101
Válvula de presión	PCV-101

- **Lazo de nivel 102:**

En la columna de absorción se deben evitar las situaciones de inundación, que provoquen una acumulación excesiva de líquido en el fondo y en el lecho de la misma, disminuyendo significativamente la eficacia del contacto, y poniendo en riesgo la integridad mecánica del equipo. Para evitarlo, se instala el lazo de control de nivel que regula la evacuación de líquido para evitar situaciones de riesgo. Los elementos del lazo se indican en la tabla 20.

Tabla 20 - Elementos del lazo 102

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-102
Controlador-Indicador de nivel	PIC-102
Válvula de nivel	PCV-102

### 8.6.2. Reactor R-101

El control del reactor se ve simplificado al tratarse de una reacción endotérmica, que por tanto no es susceptible de producir un episodio de reactividad química descontrolada. El principal objetivo del lazo de control será por tanto mantener la temperatura de salida dentro de especificaciones para garantizar la calidad del producto.

#### - Lazo de temperatura 106:

El lazo mide la temperatura de la corriente gaseosa de salida del reactor, fundamentalmente para garantizar que esta se encuentra dentro de especificaciones, y que por tanto el rendimiento alcanzado por la reacción es máximo. Para ello, el elemento final de control actúa sobre el caudal de la corriente de fluido calefactor a la carcasa del reactor. Los elementos del lazo se muestran en la tabla 2°.

Tabla 21 - Elementos del lazo de temperatura 104

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-106
Controlador-Indicador de temperatura	TIC-106
Válvula de temperatura	TCV-106

### 8.6.3. Intercambiadores de calor

Se utiliza un lazo simple de control de temperatura que se describe a continuación

#### - Lazos de temperatura 103, 104, 105 y 107 :

Los lazos miden la temperatura de salida de la corriente de proceso en los intercambiadores, regulando el caudal de fluido calefactor (lazos 103, 104, 105) o fluido refrigerante (lazo 107), para mantenerla dentro de especificaciones. Los elementos de ambos lazos se muestran en la tabla 22.

Tabla 22 - Elementos de los lazos de temperatura en los intercambiadores

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-103/104/105/107
Controlador-Indicador de temperatura	TIC-103/104/105/107
Válvula de temperatura	TCV-103/104/105/107

#### 8.6.4. Torre de destilación T-102

A continuación se detallan los lazos utilizados para el control de la columna de destilación, con los que se establece una estrategia de control sencilla y comúnmente utilizada:

- **Lazo de temperatura 109:**

El lazo de temperatura 109 tiene como objetivo el control del grado de separación de los productos. El lazo actúa sobre el aporte energético al *reboiler* de la caldera, para regular el caudal de vapor en la columna, y por tanto el grado de separación alcanzado. Es una estrategia alternativa al control de composición basado en la regulación del caudal del destilado, frente al que ofrece la ventaja de una respuesta más rápida en lazo cerrado. Los elementos del lazo se listan en la tabla 23. [30]

Tabla 23 - Elementos del lazo de temperatura 107

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-109
Controlador-Indicador de temperatura	TIC-109
Válvula de temperatura	TCV-109

- **Lazo de presión 111:**

Se utiliza para mantener dentro de especificaciones la presión en la cabeza de la columna. Se mide la presión en la misma, y en función de ella se regula el caudal de refrigerante al condensador; de forma que aun aumento de la presión se traduce en un aumento de la velocidad de condensación, disminuyendo la presión. Los elementos del lazo se listan en la tabla 24.

Tabla 24 - Elementos del lazo de presión 111

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-111
Controlador-Indicador de presión	PIC-111
Válvula de presión	PCV-111

- **Lazo de nivel 112:**

Tiene como objetivo mantener dentro de especificaciones el nivel de líquido en el tanque de destilado, para lo que regula el caudal de destilado que se extrae de la columna. Se deben evitar situaciones de inundación o vaciado del tanque, que afectan a la estabilidad de la operación de la columna al variar el caudal de reflujo. Los componentes del lazo se listan en la tabla 25.

**Tabla 25 - Elementos del lazo de nivel 110**

<b>Instrumento</b>	<b>Identificador</b>
Transmisor de nivel	LT-112
Controlador-Indicador de nivel	PIC-112
Válvula de nivel	PCV-112

- **Lazo de flujo 110:**

Tiene como objetivo regular el reflujo a la columna, manteniendo el caudal dentro de las especificaciones, de forma que en el interior de la columna se alcancen los flujos molares especificados, y con ellos el grado de separación requerido. Los componentes se listan en la tabla 26.

**Tabla 26 - Elementos del lazo de flujo 108**

<b>Instrumento</b>	<b>Identificador</b>
Transmisor de flujo	FT-110
Controlador-Indicador de flujo	FIC-110
Válvula de flujo	FCV-110

- **Lazo de nivel 108:**

El lazo mantiene el nivel de líquido en el fondo de la columna estable, y evita situaciones de vaciado o inundación de la columna, actuando sobre el caudal de producto de colas que se extrae de la columna. Los elementos que lo conforman se listan en la tabla 27.

**Tabla 27 - Elementos del lazo de nivel 106**

<b>Instrumento</b>	<b>Identificador</b>
Transmisor de flujo	FT-108
Controlador-Indicador de flujo	FIC-108
Válvula de flujo	FCV-108

**8.6.5. Alarmas**

En el proceso se instalan una serie de alarmas para monitorizar una serie de variables críticas que deben permanecer dentro de un rango de valores determinado para garantizar la operación segura. Los tipos de variables monitorizadas, así como las alarmas de dicho tipo instaladas en el proceso, se enumeran a continuación:

- **Alarmas de nivel:** Se utilizan alarmas de nivel para alertar de cuando se alcanza un nivel crítico, tanto por encima (alarma de nivel alto o LAH según la nomenclatura ISA) como por debajo (alarma de nivel bajo o LAL). En el proceso, se instalan en los fondos de las columnas de absorción (LAH 102) y de la columna de destilación (LAL 105 y LAH 106).
- **Alarmas de presión:** Se utilizan para monitorizar la presión en el equipamiento, y alertar en caso de que se alcancen niveles críticos. Se utilizan alarmas de presión alta (PAH) y de presión baja (PAL). Se instalan en las cabezas de las columnas de absorción (PAH 101) y de destilación (PAL 107, PAH 108). Las de presión alta se utilizan como medida de seguridad general, para evitar que por cualquier motivo se pudiesen alcanzar presiones que pusiesen en riesgo la integridad mecánica del equipo, mientras que la alarma de presión baja instalada en la columna de destilación permite detectar condiciones anómalas en las que se esté produciendo una alta caída de presión en los platos.
- **Alarmas de temperatura:** Se utilizan para monitorizar los gases de salida del reactor. La de temperatura baja (TAL 103) permite identificar una situación de pérdida del fluido calefactor, con el consiguiente efecto sobre la conversión alcanzada, mientras que la alarma de temperatura alta (TAH 104) responde a la situación contraria, donde un exceso de flujo del fluido calefactor puede disparar la temperatura, con el consiguiente efecto negativo sobre el catalizador, que puede sufrir sinterización y desactivación.

## **9. Legislación y normativa de aplicación**

### **9.1. Legislación relativa a la seguridad industrial**

#### **9.1.1. Legislación europea**

- Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas y por la que se modifica y ulteriormente deroga la Directiva 96/82/CE. (SEVESO III)
- Reglamento (CE) n° 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo del 18 de diciembre del 2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).
- Reglamento (CE) n° 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas. (Reglamento CLP).
- Directiva 2014/34/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas

#### **9.1.2. Legislación nacional**

- Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
- Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas.
- Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
- Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23
- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-1, MIE-APQ-2, MIE-APQ-3, MIE-APQ-4, MIE-APQ-5, MIE-APQ-6 y MIE-APQ-7.

- Real Decreto 105/2010, de 5 de febrero, por el que se modifican determinados aspectos de la regulación de los almacenamientos de productos químicos y se aprueba la instrucción técnica complementaria MIE APQ-9 «almacenamiento de peróxidos orgánicos»
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- Real Decreto 513/2017, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios.

## **9.2. Legislación relativa a la seguridad e higiene laboral**

### **9.2.1. Legislación europea**

- Reglamento (UE) 2016/425 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2016, relativo a los equipos de protección individual y por el que se deroga la Directiva 89/686/CEE del Consejo.
- Directiva 92/58/CEE del Consejo, de 24 de junio de 1992, relativa a las disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y de salud en el trabajo.
- Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 1999, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas.

### **9.2.2. Legislación nacional**

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.

- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.
- Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.
- Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

### **9.3. Legislación medioambiental**

#### **9.3.1. Legislación europea**

- Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
- Decisión 2006/507/CE del Consejo, de 14 de octubre de 2004, relativa a la firma, en nombre de la Comunidad Europea, del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes.

#### **9.3.2. Legislación nacional**

- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.

- Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.
- Real Decreto-ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.

#### **9.4. Legislación relativa a la fase de obra**

##### **9.4.1. Legislación nacional**

- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- Ley 32/2006, de 18 de octubre, reguladora de la subcontratación en el Sector de la Construcción.
- Real Decreto 1109/2007, de 24 de agosto, por el que se desarrolla la Ley 32/2006, de 18 de octubre, reguladora de la subcontratación en el Sector de la Construcción.
- Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.

## **9.5. Normas técnicas y códigos de diseño**

### **9.5.1. Recipientes a presión**

- ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) *Boiler and Pressure Vessel Code, section VIII.*
- BS (*British Standard*) *5500 Pressure Vessel Design.*
- UNE-EN 13445:2015 *Recipientes a presión no sometidos a llama.*
- Normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

### **9.5.2. Intercambiadores de calor**

- Normas TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association, USA*).
- BS (*British Standard*) *3274 Specification for Tubular Heat Exchangers.*
- BS (*British Standard*) *3606 Specification for Steel Tubes for Heat Exchangers.*

## **10. Seguridad en el diseño y en la operación**

### **10.1. Clasificación de las sustancias y la instalación**

#### **10.1.1. Legislación**

La clasificación de la instalación se realiza de acuerdo al Real Decreto 840/2015, que traspone al ordenamiento jurídico español la directiva 2012/18/UE conocida como directiva Seveso III, derogando el anterior Real Decreto 1254/1999.

El RD 840/2015 tiene como objeto la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, así como la limitación de sus consecuencias sobre la salud humana, los bienes y el medio ambiente. Es de aplicación a cualquier establecimiento que coincida con la definición presentada en el artículo 3, y que no sea excluido por el artículo 2:

- Establecimiento: “la totalidad del emplazamiento bajo el control de un industrial en el que se encuentren sustancias peligrosas en una o varias instalaciones, incluidas las infraestructuras o actividades comunes o conexas; los establecimientos serán de nivel inferior o de nivel superior”.

Como se indica en la definición, los establecimientos se clasifican en dos niveles, superior o inferior, según las cantidades de sustancias peligrosas presentes en el mismo y atendiendo a los límites expuestos en el anexo I. En el caso de que no se alcancen las cantidades que clasificarían a la instalación como nivel inferior, el reglamento no sería de aplicación y los requerimientos de documentación serían inferiores.

El Anexo I se encuentra dividido en dos partes: La primera hace referencia a sustancias peligrosas de forma genérica, refiriéndose a la clasificación presente en el reglamento CE nº 1272/2008 o reglamento CLP. La segunda hace referencia a sustancias peligrosas específicas, que se denominan “sustancias peligrosas nominadas”.

Por tanto, para clasificar la instalación, se debe comenzar por identificar las sustancias presentes y clasificarlas en relación al reglamento CLP, para posteriormente comparar las cantidades presentes en la planta con los umbrales indicados en el RD 840/2015.

El reglamento CLP clasifica las sustancias según el peligro físico (Anexo I, Parte 2), el peligro para la salud (Anexo I, Parte 3) y el peligro para el medio ambiente (Anexo I, parte 4). A cada una de las categorías presentes en estas partes del Anexo I se le asigna un código de indicación de peligro H-xxx, que se encuentran recogidos en el Anexo III.

Además, también se asignan códigos de información suplementaria (EUH-xxx) y códigos de consejos de prudencia (P-xxx). La lista de sustancias con sus correspondientes códigos de peligro se encuentra en el Anexo VI.

### 10.1.2. Caracterización de las sustancias según CE n° 1272/2008

Tabla 28 - Clasificación de la butan-2-ona

<b>Butan-2-ona</b>	
<b>N° CE</b>	201-159-0
<b>N° CAS</b>	78-93-3
<b>Substancia nominada</b>	No
<b>Indicaciones de peligro H</b>	225, 319, 336
<b>Indicaciones adicionales EUH</b>	066

Tabla 29 - Clasificación del butan-2-ol

<b>Butan-2-ol</b>	
<b>N° CE</b>	201-158-5
<b>N° CAS</b>	78-92-2
<b>Substancia nominada</b>	No
<b>Indicaciones de peligro H</b>	226, 319, 335, 336
<b>Indicaciones adicionales EUH</b>	No

Tabla 30 - Clasificación del hidrógeno

<b>Hidrógeno</b>	
<b>N° CE</b>	215-605-7
<b>N° CAS</b>	133-74-0
<b>Substancia nominada</b>	Si
<b>Indicaciones de peligro H</b>	220, Press. Gas
<b>Indicaciones adicionales EUH</b>	No

A continuación se presenta una tabla con el significado de los códigos de peligro recopilados para las sustancias en el proceso:

Tabla 31 - Códigos de indicación de peligro

<b>Código</b>	<b>Significado</b>
H 220	Gas inflamable, categoría 1
H 225	Líquido inflamable, categoría 2
H 226	Líquido inflamable, categoría 3
H 319	Lesiones oculares o irritación ocular, cat.1
H 335	Toxicidad en exposición única, v. resp., cat. 3
H 336	Toxicidad en exposición única, narcosis, cat.3
EUH 066	Irritación en exposición cutánea repetida

Adicionalmente se precisan las definiciones del significado de los códigos de peligro, de acuerdo a la clasificación expuesta en el Anexo I del reglamento:

- **Gas inflamable:** Se distinguen dos categorías, perteneciendo el hidrógeno a la primera:

Tabla 32 - Criterios para la clasificación de gases inflamables

Categoría	Criterio
1	Aquellos que a 20 °C y 101,3 kPa: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Inflamables en mezclas con aire en proporciones iguales o inferiores al 13% en volumen</li> <li>– Banda de inflamabilidad con aire de al menos 12 puntos porcentuales</li> </ul>
2	Gases inflamables con aire a 20 °C y 101, 3 kPa, que no se incluyan en la categoría 1.

- **Líquido inflamable:** Existen 3 categorías, la buta-2-ona se incluye en la categoría 2, y el butan-2-ol en la 3:

Tabla 33 - Criterios para la clasificación de los líquidos inflamables

Categoría	Criterio
1	Punto de inflamación < 23 °C y punto de ebullición inicial ≤ 35 °C
2	Punto de inflamación < 23 °C y punto de ebullición inicial > 35 °C
3	Punto de inflamación entre los 23 °C y los 60 °C

- **Lesiones oculares graves o irritación ocular:** Las sustancias con efectos sobre el tejido ocular se clasifican en 2 categorías, perteneciendo la butan-2-ona a la segunda de ellas:

Tabla 34 - Criterios para la clasificación de sustancias que causan lesiones oculares o irritación ocular

Categoría	Criterio
1	Daño a los tejidos o deterioro físico importante de la visión, no totalmente reversible en 21 días
2	Alteraciones oculares totalmente reversibles en 21 días

- **Toxicidad específica en determinados órganos (Stot) por exposición única:** Se aplica a aquellas sustancias que generen efectos tóxicos no letales en órganos específicos tras una única exposición. Incluye todos los efectos significativos para la salud, reversibles o irreversibles. Se clasifican las sustancias según el tipo de efecto, y la clase de peligro, que determina la categoría:

**Tabla 35 - Criterios para la clasificación de sustancias Stot tras exposición única**

<b>Categoría</b>	<b>Criterio</b>
1 y 2	Efectos tóxicos significativos o nocivos para la salud humana
3	Efectos transitorios: narcóticos e irritación en las vías respiratorias.

Los efectos identificados en las sustancias del proceso son de categoría 3, narcóticos para la butan-2-ona y el butan-2-ol, e irritantes en las vías respiratorias para el butan-2-ol.

### 10.1.3. Clasificación de la instalación según RD 840/2015

Para el hidrógeno, como sustancia nominada los límites vienen definidos en la parte 2 del Anexo I. Los inventarios en proceso se consideran para un tiempo de almacenamiento de productos y materias primas de 7 días.

**Tabla 36 - Cantidades umbral para el hidrógeno**

<b>Categoría de peligro/sustancia peligrosa</b>	<b>Inventario (t)</b>	<b>Umbral inferior (t)</b>	<b>Umbral superior (t)</b>
Hidrógeno	12,2	5	50

Las sustancias no nominadas se asignan a las categorías presentes en la parte 1 del mismo anexo en función de su clasificación CLP. Para la butan-2-ona y el butan-2-ol, la única categoría que aplica es la P5, correspondiente a los líquidos inflamables, que tiene 3 subcategorías:

- P5a: Para líquidos inflamables de la categoría 1, líquidos inflamables de las categorías 2 o 3 mantenidos a una temperatura superior a su punto de ebullición, u otros líquidos con punto de ebullición inferior a 60 °C, mantenidos por encima de esa temperatura.
- P5b: Líquidos inflamables de las categorías 2 o 3 cuando las condiciones de proceso puedan crear peligros de accidentes graves u otros líquidos con punto de ebullición inferior a 60 °C en condiciones similares.
- P5c: Líquidos de las categorías 2 o 3 no comprendidos en P5a y P5b.

Dado que en el proceso se trabaja en fase vapor en la etapa de reacción, y con líquido y vapor saturado en la columna de destilación, se va a considerar que ambos pertenecen a la categoría P5a. Se consideran las cantidades umbral de ambas sustancias por separado.

Tabla 37 - Cantidades umbral para la butan-2-ona y el butan-2-ol

Categoría de peligro/substancia peligrosa	Inventario (t)	Umbral inferior (t)	Umbral superior (t)
Butan-2-ona	436	10	50
Butan-2-ol	460	10	50

Como se puede observar en las tablas 35 y 36, se alcanzan las cantidades umbral para las tres sustancias relevantes, por lo que se clasifica la instalación como SEVESO.

#### 10.1.4. Etiquetado CLP y NFPA

Se muestran los requisitos de etiquetado CLP para las clases de peligro identificadas anteriormente:

Tabla 38 - Etiquetado CLP





Clase de peligro	Gas inflamable cat. 1
Pictograma	
Indicación de peligro Consejos de prudencia P-xxx	H 220: Gas extremadamente inflamable 210, 377, 381, 403
Clase de peligro	Líquido inflamable cat. 2 o 3
Pictograma	
Indicación de peligro Consejos de prudencia P-xxx	H 225: Líquido y vapores muy inflamables (cat.2) H 226: Líquido y vapores inflamables (cat.3) 210, 233, 240, 241, 242, 243, 280, 303, 361, 353, 370,378, 403, 235, 501
Clase de peligro	Lesiones oculares graves o irritación, cat. 2
Pictograma	
Indicación de peligro Consejos de prudencia P-xxx	H 319: Provoca irritación ocular grave 264, 280, 305, 351, 338, 337, 313




Tabla 39 - Etiquetado CLP

Clase de peligro	Toxicidad específica, exposición única, cat.3
Pictograma	
Indicación de peligro	H 335: Puede irritar las vías respiratorias H 336: Puede provocar somnolencia o vértigo.
Consejos de prudencia P-xxx	261, 271, 304, 340, 312, 403, 233, 405, 501

La NFPA (*National Fire Protection Association*, USA) presenta en su estándar n° 704 (*Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response*) un método para la representación gráfica de los peligros asociados a una sustancia química. Consiste en un rombo subdividido en 4 rombos de menor tamaño, que según el color indican: efectos sobre la salud (azul), inflamabilidad (rojo), reactividad (amarillo) y especiales (blanco). A cada una de las tres primeras categorías se le asigna un número del 0 al 4, en función del nivel de peligro, y a la categoría especial, un símbolo en función del peligro (oxidante, reacción peligrosa con agua o asfixiante).

Para las sustancias inventariadas:

Tabla 40 - Diamantes NFPA

Substancia	Diamante NFPA
Butan-2-ona	
Butan-2-ol	
Hidrógeno	

## 10.2. Estudio básico de reactividad

El estudio básico se va a realizar apoyado en el software *Chemical Reactivity Worksheet v. 4* desarrollado por AIChE (*American Institute of Chemical Engineers*), NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*), en colaboración *Dow Chemical* y *MTI (Materials Technology Institute)*.

En el software se pueden incorporar sustancias a una mezcla, y el programa determinará, a partir de su base de datos, la compatibilidad entre todos los pares de sustancias. Se introducen en el software las sustancias presentes en el proceso (agua, hidrógeno, butan-2-ona y butan-2-ol, que aparece en el software como *sec-butyl-alcohol*), obteniendo la tabla de compatibilidad mostrada en la figura 15.

NFPA				Proceso Compatibility Chart	2-BUTANONE	HYDROGEN	SEC-BUTYL ALCOHOL	WATER
Health	Flammability	Instability	Special					
1	3	0		2-BUTANONE				
0	4	0		HYDROGEN	N			
2	3	0		SEC-BUTYL ALCOHOL	C	C		
				WATER	Y	Y	Y	

Figura 15 - Tabla de compatibilidad elaborada por CRW4 para la corriente de proceso

A continuación se detallan las interacciones en las que existe riesgo:

- **Hidrógeno/Butan-2-ona:** El programa identifica posibles reacciones entre cetonas y reductores débiles, y cita como fuente a la enciclopedia Kirk-Othmer para la reacción de acetona-hidrógeno. Sin embargo, consultando la fuente, [2], se observa que la reacción de reducción de las cetonas es catalítica (catalizadores de paladio, platino y níquel) y ocurre bajo condiciones severas de temperatura. Por lo tanto, no representa un riesgo previsible dentro del proceso, pero cabría estudiarlo como una posible reacción en un escenario de accidente en la zona del reactor, aunque este escenario ve minimizada su probabilidad al operar con una reacción endotérmica.

- **Butan-2-ol/Butan-2-ona:** Las mezclas de butan-2-ol y butan-2-ona pueden formar peróxidos orgánicos altamente reactivos tras largos periodos de almacenamiento, especialmente si están expuestos a la luz solar. El peligro ya se había identificado al caracterizar la butan-2-ona, ya que por sí misma puede formar peróxidos en largos periodos de almacenamiento. Para evitarlo, se utilizan tanques sellados, con recubrimientos en el interior para evitar el contacto con el acero, y purgados con gases inertes para evitar la autoxidación con el oxígeno atmosférico.
- **Butan-2-ol/Hidrógeno:** Para este par de sustancias el software simplemente recomienda realizar un estudio de reactividad para asegurar que no existen reacciones significativas entre el butan-2-ol y el hidrógeno, en las que este segundo se comportaría como un agente reductor. El propio software menciona que no existen datos específicos que apunten a una reacción entre un alcohol y un reductor débil.

Adicionalmente, se puede introducir en la mezcla oxígeno y dióxido de carbono, para analizar las posibles reacciones peligrosas en un escenario de fuga, en el que la corriente de proceso entre en contacto con el aire (se excluye el nitrógeno al tratarse de un gas inerte) (figura 16).

NFPA				Fuga Compatibility Chart	2-BUTANONE	CARBON DIOXIDE	HYDROGEN	OXYGEN	SEC-BUTYL ALCOHOL
Health	Flammability	Instability	Special						
1	3	0		2-BUTANONE					
				CARBON DIOXIDE	Y				
0	4	0		HYDROGEN	N	Y			
3	0	0	OX	OXYGEN	N	Y	N		
2	3	0		SEC-BUTYL ALCOHOL	C	Y	C	N	

Figura 16 - Tabla de compatibilidad elaborada por CRW4 para el escenario de fuga

Adicionalmente a los riesgos identificados anteriormente, se identifican incompatibilidades entre el oxígeno y el hidrógeno/butan-2-ol/butan-2-ona, que responden fundamentalmente a la combustión con los tres, y a la formación de peróxidos orgánicos con la buta-2-ona y el butan-2-ol. Las reacciones de combustión son especialmente significativas, ya que implican la formación de un alto volumen de gases, y la posibilidad de escenarios de deflagración o detonación.

### 10.3. Identificación simple de escenarios de accidente

En este apartado se utiliza la metodología de palabras guía/variable para la determinación de posibles escenarios de accidente de forma simple, dado que el nivel de definición alcanzado en un trabajo académico no permite la utilización de métodos complejos. Una vez que el proyecto se encontrase en una fase de desarrollo más avanzada, sería necesario utilizar algún método complejo tipo HAZOP para determinar adecuadamente los posibles escenarios de accidente.

El análisis se va a realizar sobre el equipo diseñado, la columna de destilación T-102, que opera con compuestos altamente inflamables. El análisis se va a particularizar sobre dos nodos, el primero en la zona de cabezas, incluyendo el condensador y el tanque de reflujo, y el segundo sobre la zona de colas, incluyendo la caldera de la columna.

Tabla 41- Identificación de riesgos asociados al nodo de cabezas de la columna T-102

Palabra Guía	Variable	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Recomendaciones
Más	Presión	1. Fallo del lazo de control 111	1.1 Sobrepresurización de la columna y el condensador	1.1.1 Alarma de presión alta PAH 108	-
		2. Perdida del caudal de refrigerante	2.1 Sobrepresurización de la columna y el condensador	2.1.1 Alarma de presión alta PAH 108	Asegurar el suministro de refrigerante mediante sistemas redundantes
	Nivel	2. Fallo de lazo de control de nivel 112	2.1 Inundación del tanque de reflujo	-	Instalar alarma de nivel alto en el tanque de reflujo
	Flujo	3. Fallo del lazo de control de flujo 110	3.1 Problemas de inundación en la columna	-	Revisiones periódicas del lazo de control
Menos	Nivel	4. Fallo del lazo de control de nivel 112	4.1 Vaciado del tanque de reflujo	-	Instalar alarma de nivel bajo en el tanque de reflujo
	Flujo	5. Fallo del lazo de control de flujo 110	5.1 Problemas de operación hidráulica en la columna	-	Revisiones periódicas del lazo de control

Tabla 42 - Identificación de riesgos asociados al nodo de fondos de la columna T-102

Palabra Guía	Variable	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Recomendaciones
Más	Temperatura	1. Fallo del lazo de control 109	1.1. Flujo de vapor excesivo en la columna	-	Revisiones periódicas del lazo de control
		2. Cambio en las condiciones del fluido calefactor	2.1 Flujo excesivo de vapor en la columna	-	Asegurar un suministro estable en el punto de generación de la utilidad
	Nivel	3. Fallo de lazo de control de nivel 108	3.1 Inundación del fondo de la columna	-	Revisiones periódicas del lazo de control
Menos	Temperatura	4. Fallo del lazo de control 109	4.1 Flujo de vapor en la columna insuficiente	-	Revisiones periódicas del lazo de control
		5. Perdida del fluido calefactor	5.1 Flujo de vapor en la columna insuficiente	-	Asegurar el suministro de fluido calefactor con sistemas redundantes
		6. Cambio en las condiciones del fluido calefactor	6.1 Flujo de vapor en la columna insuficiente	-	Asegurar un suministro estable en el punto de suministro de la utilidad
	Nivel	5. Fallo del lazo de control de flujo 108	5.1 Problemas de operación hidráulica en la columna	-	Revisiones periódicas del lazo de control

#### 10.4. Índice DOW

En la instalación se trabaja con compuestos extremadamente inflamables, por lo que resulta de interés realizar algún tipo de evaluación del riesgo en la instalación. En concreto, se va a aplicar el índice DOW de fuego y explosión a la unidad diseñada, la columna de destilación T-102. En ella, se manejan mezclas formadas fundamentalmente por butan-2-ona y butan-2-ol, en fase líquida y vapor (saturados), por lo que en un escenario de accidente se pueden generar mezclas con aire dentro de los límites de inflamabilidad.

El índice DOW es un método semicuantitativo de análisis de riesgos basado en índices. En concreto, el método genera un índice representativo del riesgo de fuego y explosión, F&EI, a partir de la combinación de 3 factores: de riesgo general en el proceso (F1), de riesgos especiales en el proceso (F2), y del material (MF). Se va seguir la séptima edición del método, que presenta algunas diferencias con ediciones anteriores. [31]

El procedimiento de cálculo comienza por determinar el índice de material para las sustancias presentes en el proceso. Si la sustancia está tabulada en el apéndice A, se toma directamente el valor presentado. Si no estuviese tabulado, habría que seguir el procedimiento de cálculo indicado en el método. Para la columna de destilación, se va a tomar el índice material de la butan-2-ona, que es el compuesto mayoritario en la columna y aparece tabulado. Los otros compuestos son el agua (trazas) y el butan-2-ol, que tiene unas propiedades físicas muy similares a la butan-2-ona, y es menos inflamable.

Tabla 43 - Factor material MF para la butan-2-ona [31]

Compuesto	MF	NH	HC (BTU/lb)	Punto Flash (°F)	Punto Ebullición (°F)
Butan-2-ona	16	1	13,5x10 <sup>3</sup>	16	176

Tal y como se indica en el apartado D de la sección dedicada a la determinación del factor material, en este caso no es necesario realizar un ajuste por temperatura del factor al tratarse de un compuesto con un punto flash inferior a los 140 °F.

Una vez determinado el factor material, se determina el factor de riesgo general del proceso (F1). Para ello se suma al factor base 1, los factores de penalización identificados de entre los presentes en la sección 1 de la tabla de cálculo del método, que se presenta en la tabla 44.

Tabla 44 - Factor de riesgos generales F1 para la columna de destilación T-102

Factor de riesgo general de proceso F1	Rango	Valor
Factor base	1	1
Reacción exotérmica	0,3-1,25	-
Procesos endotérmicos	0,2-0,4	-
Transferencia y manejo de materiales	0,25-1,05	-
Unidades de proceso cerradas	0,25-0,9	-
Acceso	0,20-0,35	-
Desagües	0,25-0,50	0,5
<b>TOTAL</b>	-	<b>1,5</b>

Para la columna de destilación, la mayoría de condiciones que determinan el factor F1 no son de aplicación. Se detalla una explicación para cada uno de ellos:

- **Reacción exotérmica:** En la columna no tienen lugar reacciones exotérmicas, por lo que no se aplica factor de penalización.
- **Reacción endotérmica:** De forma análoga que para la reacción endotérmica, no se aplica factor de penalización
- **Transferencia y manejo de materiales:** Este factor, tal y como se especifica en la guía, hace referencia a operaciones en discontinuo, por lo que no se aplica penalización en el caso de la columna de destilación.
- **Acceso:** La columna de destilación se instala en la batería de proceso, situada al aire libre, por lo que no se aplica penalización.
- **Desagües:** No se ha realizado el diseño de los desagües o cubetos de contención, por lo que se aplica la máxima penalización posible. En el caso de que se usase un cubeto de contención, la penalización indicada por la guía sigue siendo de 0,5.

Una vez determinado el factor F1 se procede a la determinación del factor F2, de riesgos especiales del proceso, que se resume en la tabla 45 y se detalla a continuación:

- **Materiales tóxicos:** La butan-2-ona tiene un factor NH con valor 1, que según la guía la clasifica como una sustancia que en exposiciones cortas puede causar irritación o lesiones menores reversibles. El factor de penalización se calcula como  $0,2 \cdot NH$ , que en este caso da un valor final de 0,20.
- **Presión subatmosférica:** Las condiciones en la columna de destilación nunca alcanzan presiones inferiores a la atmosférica, con lo que la penalización no aplica.

- **Operación en o cerca de condiciones de inflamabilidad:** Se considera que la columna puede alcanzar las condiciones de inflamabilidad en caso de fallo del equipo, por lo que se asigna una penalización de 0,3.
- **Explosión de polvo:** Al no trabajarse con material particulado, si no con líquidos, no se considera penalización.
- **Presión de alivio:** Dado que la columna trabaja a presión atmosférica, no se aplica penalización.
- **Temperatura baja:** La columna opera en el rango de los 60-100 °C, con lo que no existe efecto sobre la resistencia del acero por baja temperatura, y no se aplica penalización.
- **Cantidad de material inflamable:** La guía especifica como cantidad a estudiar el volumen de material que se puede emitir de la unidad o de las unidades conectadas en 10 minutos. Dado la dificultad de evaluar la cantidad de líquido presente en el interior de la columna en condiciones de operación, se va a estimar la cantidad como la cantidad total que podría albergar la columna en condiciones de inundación. Para ello, se estima el volumen de la columna a partir de los datos del diseño hidráulico y mecánico recogidos en los cálculos justificativos, que resulta de aproximadamente 200 m<sup>3</sup>. Este volumen se multiplica por la densidad de la butan-2-ona a 20°C, indicado en la tabla 2, 840 kg/m<sup>3</sup>, con lo que el valor total de la masa de butan-2-ona en la columna es de 1,68x10<sup>5</sup> kg. Este valor está altamente sobredimensionado, y si el objetivo del cálculo del índice DOW fuese distinto al de evaluar de forma preliminar el riesgo en la unidad, debería revisarse. El valor de la masa se multiplica por la entalpía de combustión de la sustancia indicada por la guía, que se recoge en la tabla 39, obteniendo un valor de 2,27x10<sup>9</sup> BTU. Con este valor, se obtiene un factor de penalización de aproximadamente 1,9 en la figura 17.

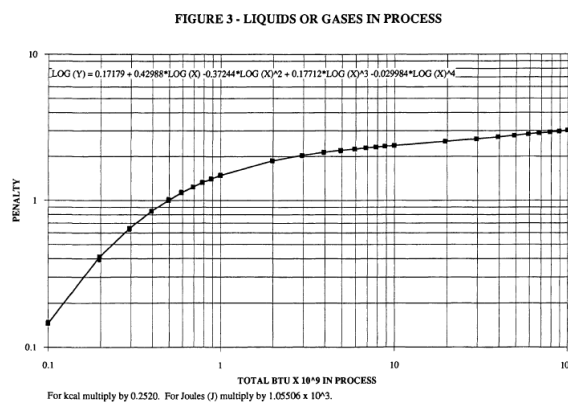


Figura 17 - Curva para el cálculo de penalización por cantidad de material inflamable de líquidos en proceso [31]

- **Corrosión y erosión:** Las condiciones en el proceso no son demasiado corrosivas, por lo que se asigna una penalización en la zona baja del rango de 0,20.
- **Fugas por uniones y empaquetaduras:** Se va a asignar un valor en la zona inferior del rango, ya que las bombas de la columna deberán estar adecuadamente diseñadas para evitar las fugas. El valor adoptado es de 0,10.
- **Uso de calentadores con llama abierta:** No se utilizan este tipo de calentadores ni en la columna ni en su cercanía, por lo que no se aplica penalización.
- **Sistema de intercambio con aceite térmico caliente:** No se utiliza en la columna, por lo que no se aplica penalización.
- **Equipos rotativos:** Se va a asignar un valor de 0,5 de forma preventiva, para tener en cuenta la bomba de recirculación del reflujo.

Tabla 45 – Factor de riesgos especiales F2 para la columna de destilación T-102

Factor de riesgos especiales del proceso	Rango	Valor
Factor base	1	1
Materiales tóxicos	0,20-0,80	0,20
Presión subatmoférica	0.5	-
Operación en o cerca de condiciones de inflamabilidad	0,3-0,8	-
Explosión de polvo	0,25-2	-
Presión de alivio	-	-
Temperatura baja	0,2-0,3	-
Cantidad de material inflamable	-	1,9
Corrosión y erosión	0,10-0,75	0,20
Fugas por uniones y empaquetaduras	0,1-1,5	0,1
Uso de calentadores con llama abierta	-	-
Sistema de intercambio con aceite térmico caliente	0,1-1,15	-
Equipos rotativos	0,5	0,5
<b>TOTAL</b>	-	<b>3,9</b>

A continuación se procede al cálculo del factor de riesgo de la unidad F3, como el producto de F1 y F2, y el índice de incendio y explosión, como el producto del factor material MF por el factor de riesgo de la unidad F3, que se indican en la tabla 46.

Tabla 46 - Índice de incendio y explosión para la columna de destilación T-102

Factor	Valor
Riesgos generales F1	1,5
Riesgos especiales F2	3,9
Riesgo de la unidad F3 (F2xF1)	5,85
<b>Índice de incendio y explosión</b>	<b>93,6</b>

Con el índice de incendio y explosión determinado, se puede proceder a la categorización del nivel de riesgo asociado a la unidad. Los niveles indicados por la guía se incluyen en la tabla 47:

Tabla 47 - Niveles de riesgo en función del IIE

Rango del IIE	Nivel de riesgo
1-60	Bajo
<b>61-96</b>	<b>Moderado</b>
97-127	Intermedio
127-158	Alto
≥159	Severo

Con lo que el nivel de riesgo se encuentra dentro de la zona superior del rango clasificado como intermedio. Adicionalmente, el IIE permite determinar el radio de exposición, que se vería afectado en el caso de que tuviese lugar un escenario de accidente de explosión o incendio en la unidad. Para determinarlo se utiliza la figura 18, que para la unidad devuelve un valor de 79 ft o 24 metros.

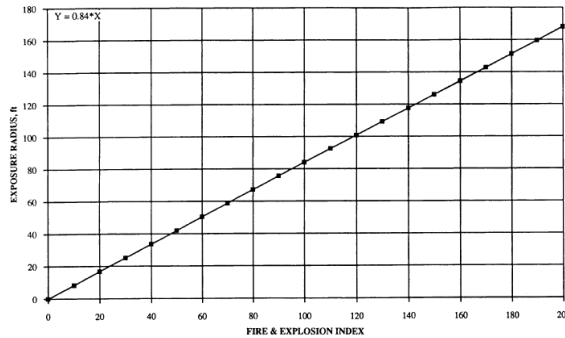


Figura 18 - Radio de exposición en función de IIE [31]

Adicionalmente, se puede determinar el área y el volumen afectados por el escenario de accidente, considerando un cilindro con el radio y la altura igual al radio de exposición determinado, como se muestra en la figura 15. El área afectada es de 1809,6 m<sup>2</sup>, y el volumen de 4,34x10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>.

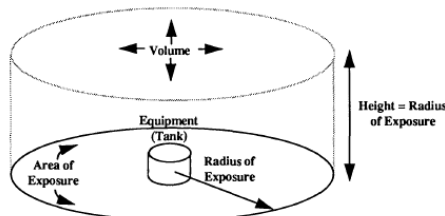


Figura 19 - Determinación del área y el volumen de exposición [31]



Tabla 48 - Distancias de seguridad de aplicación

Equipos		Distancia (m)
Bomba	Reactor	3,05
Bomba	Columna	3,05
Bomba	Intercambiador	3,05
Reactor	Columna	7,63
Reactor	Intercambiador	3,05
Intercambiador	Columna	3,05
Intercambiador	Intercambiador	1,53

Bibliografía

1. **NEIER, Wilhelm y STREHLKE, Guenter.** 2-Butanone. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 5ª ed. Weinheim : VCH, 1985, Vol. A4, págs. 475-481.
2. **BRAITHWAITE, John.** Ketones. [ed.] Raymond E. KIRK y Donald F. OTHMER. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4º ed. New York : John Wiley & Sons, 1995, Vol. 14, págs. 978-1021.
3. **BAIEL, James J., SAVINI, Charles, STANAT, John E.R.** Methyl Ethyl Ketone. [ed.] John J. MCKETTA. *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. Nueva York : Marcel Dekker, 1989, Vol. 30, págs. 32-50.
4. **U.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.** *Toxicological Profile for 2-Butanone*. 1992.
5. **Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.** *Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos en España*. 2017.
6. **ICIS.** Methyl Ethyl Ketone Uses and Market Data. [En línea] 5 de Noviembre de 2007. [Citado el: 11 de Mayo de 2017.]  
<https://www.icis.com/resources/news/2007/11/05/9076041/methyl-ethyl-ketone-mek-uses-and-market-data/>.
7. **Grand View Research.** *Methyl Ethyl Ketone (MEK) Market Analysis By Application and Segment Forecast to 2020*. San Francisco : s.n., 2014.
8. **MIT Media Lab: Macro Connections Group.** Observatory of Economic Complexity: Butanone. [En línea] 2015. [Citado el: 16 de Mayo de 2017.]  
<http://atlas.media.mit.edu/en/profile/hs07/291412/>.
9. **European Comission: Market Access Database.** Trade Flow Statistics: Butanone (methyl ethyl ketone). [En línea] 2016. [Citado el: 16 de Mayo de 2017.]  
[http://madb.europa.eu/madb/statistical\\_form.htm](http://madb.europa.eu/madb/statistical_form.htm).
10. **Grand View Research.** MEK Market Size Projected To Reach \$4.01 Billion By 2024. [En línea] Agosto de 2016. [Citado el: 16 de Mayo de 2017.]  
<http://www.grandviewresearch.com/press-release/global-methyl-ethyl-ketone-mek-market>.

11. **ICIS**. Chemical Profile: Methyl Ethyl Ketone. [En línea] 3 de Septiembre de 2007. [Citado el: 16 de Mayo de 2017.] <https://www.icis.com/resources/news/2007/09/03/9058799/chemical-profile-methyl-ethyl-ketone/>.
12. **Maruzen Petrochemical**. Company Information. [En línea] Fecha no disponible. [Citado el: 16 de Mayo de 2017.] <http://www.chemiway.co.jp/en/company/index.html>.
13. **La Voz de Galicia**. En la primera fase de Morás se urbanizará el 75 % del polígono. [En línea] 24 de Enero de 2017. [Citado el: 23 de Mayo de 2017.] [http://www.lavozdegalicia.es/noticia/coruna/artexio/2017/01/24/primera-fase-moras-urbanizara-75-poligono/0003\\_201701H24C8991.htm](http://www.lavozdegalicia.es/noticia/coruna/artexio/2017/01/24/primera-fase-moras-urbanizara-75-poligono/0003_201701H24C8991.htm).
14. **Instituto Galego de Promoción Económica: IGAPE**. Suelo Industrial: Parque Empresarial de Arteixo (Morás). [En línea] 11 de Marzo de 2016. [Citado el: 23 de Mayo de 2017.] <http://www.igape.es/es/investingalicia-suelo-industrial/ficha/181>.
15. **Xunta de Galicia**. *Plan de impulso para a venda de solo empresarial en Galicia*. 2014.
16. *Equilibrium in the Dehydrogenation of Secondary Propyl and Butyl Alcohols*. **KOLB, Harry J. y BURWELL, Robert J. Jr.** 1945, J. Am. Chemical Society, Vol. 67, págs. 1084-1088.
17. **ICIS**. Pampa Texas MEK output up until 2009 - Celanese. [En línea] 19 de Diciembre de 2007. [Citado el: 16 de Mayo de 2017.] <https://www.icis.com/resources/news/2007/12/19/9088171/pampa-texas-mek-output-up-until-2009-celanese/>.
18. *Production of Methyl Ethyl KEtone from Biomass Using a Hybrid Biochemical/Catalytic Approach*. **MULTER, Alisha et. al.** 2012, Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 52, págs. 56-60.
19. *Biological Production of 2-butanone in Escherichia coli*. **YONEDA, Hisanari, TANTILLO, Dean J. y ATSUMI, Shota.** 2014, ChemSusChem, Vol. 7, págs. 92-95.
20. **HAHN, Heinz-Dieter, DÄMBKES, Georg y RUPPRICH, Norbert.** Butanols. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 5ª ed. Weinheim : VCH, 1985, Vol. A4, págs. 463-474.
21. **HÄUSINGER, Peter, LOHMÜLLER, Reiner y WATSON, Allan M.** Hydrogen. *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim : VCH, 1985, Vol. A13, págs. 297-442.
22. **Linde Group**. *Ficha de datos de seguridad: Hidrógeno Comprimido*. 2015.

23. *Reaction Kinetic Studies: Catalytic Dehydrogenation of Sec-butyl Alcohol to Methyl Ethyl Ketone*. **PERONA, Joseph J. y THODOS, George**. 2, Junio de 1957, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 3, págs. 230-235.
24. *The Dual Nature of a Catalytic Reaction: The Dehydrogenation of sec-Butyl Alcohol to Methyl Ethyl Ketone at Elevated Pressures*. **THALLER, Lawrence H. y THODOS, George**. 3, Junio de 1960, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 6, págs. 369-373.
25. *The kinetics of the brass-catalysed dehydrogenation of sec-butyl alcohol*. **FORD, F.E. y PELMUTTER D.D.** 1964, Chemical Engineering Science, Vol. 19, págs. 371-378.
26. *The dehydrogenation of 2-butanol over copper-based catalysts: optimising catalyst composition and determining kinetic parameters*. **KEULER, J.N, LORENZEN, L. y MIACHON, S.** 2001, Applied Catalysis A: General, Vol. 218, págs. 171-180.
27. **SINNOTT, R.K.** *Chemical Engineering Design*. 4th ed. Oxford : Elsevier-Butterworth-Heinemann, 2005.
28. **American Petroleum Institute**. *Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries (Part I - Sizing and Selection)*. 7ª Ed. 2000.
29. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo**. *NTP 456: Discos de ruptura (I): características*.
30. **SVRCEK, William Y., MAHONEY, Donald P., YOUNG, Brent R.** *A Real-Time Approach to Process Control*. 3ª Ed. West Sussex : John Wiley & Sons , 2014.
31. **American Institute of Chemical Engineers**. *DOW's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide*. 7ª ed. New York : s.n., 1994.
32. **Industrial Risk Insurers**. *Plant Layout and Spacing for Oil and Chemical Plants*. 1991.
33. **BERENGUER SUBILS, Mª Jose**. *NTP 521: Calidad de aire interior: emisiones de materiales utilizados en la construcción, decoración y mantenimiento de edificios*. s.l. : Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1999.

Planta de producción de Butan-2-ona

## Anexo I

Balances de Materia y Energía

## Índice

1.	Balances de materia .....	3
1.1.	Balance de materia global .....	3
1.2.	Torre T-101 .....	4
1.3.	Reactor R-101 .....	5
1.4.	Separador Líquido-Vapor V-101 .....	6
1.5.	Torre de destilación T-102 .....	7
2.	Balances de energía .....	8
2.1.	Columna de destilación T-102 .....	8
2.2.	Reactor R-101 .....	10
2.3.	Intercambiador E-101 .....	12
2.4.	Intercambiador E-102 .....	13
2.5.	Intercambiador E-103 .....	13
2.6.	Intercambiador E-104 .....	14

## 1. Balances de materia

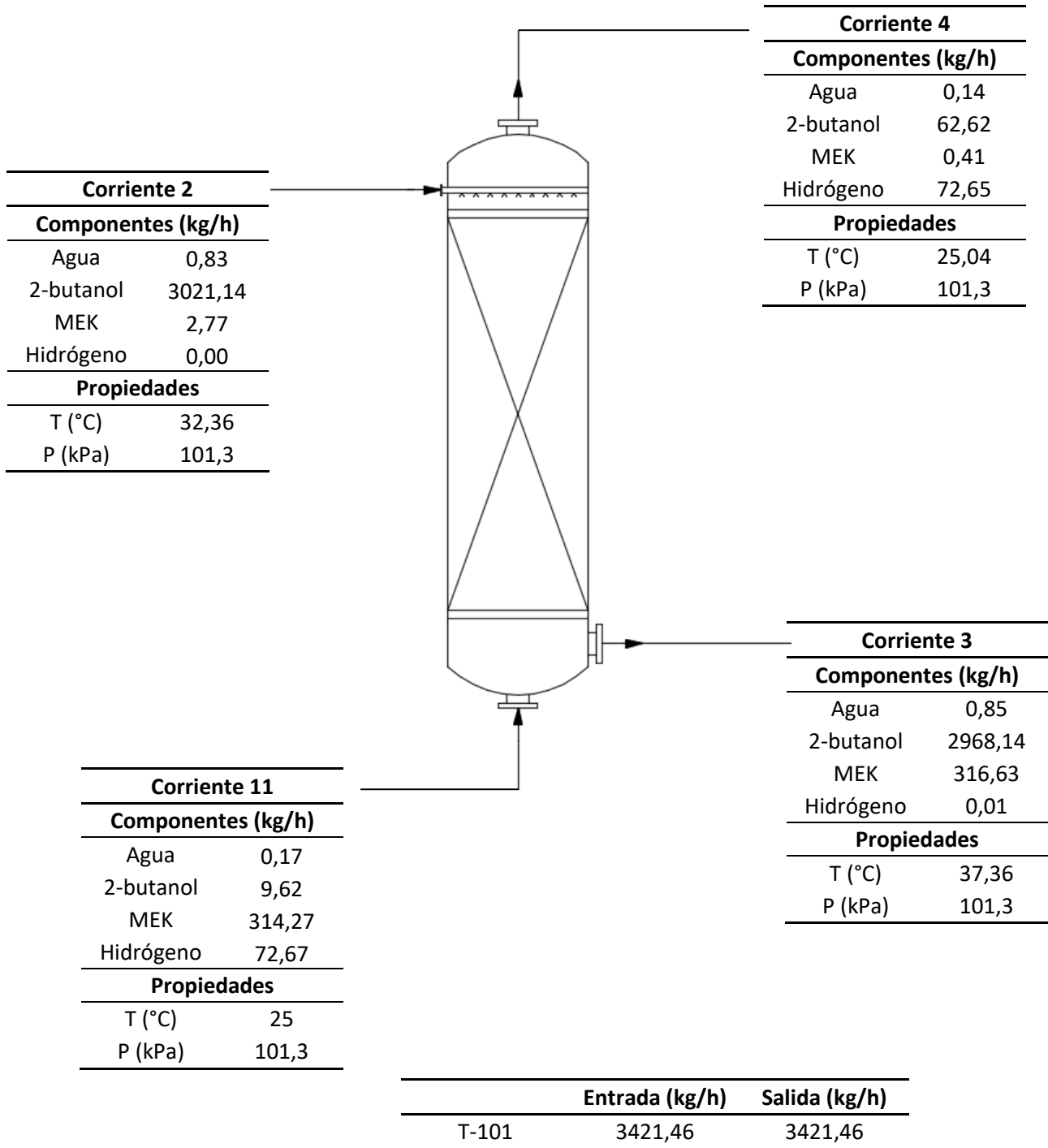
### 1.1. Balance de materia global

Se presenta en la tabla 1 el total de los flujos másicos de entrada y salida al proceso:

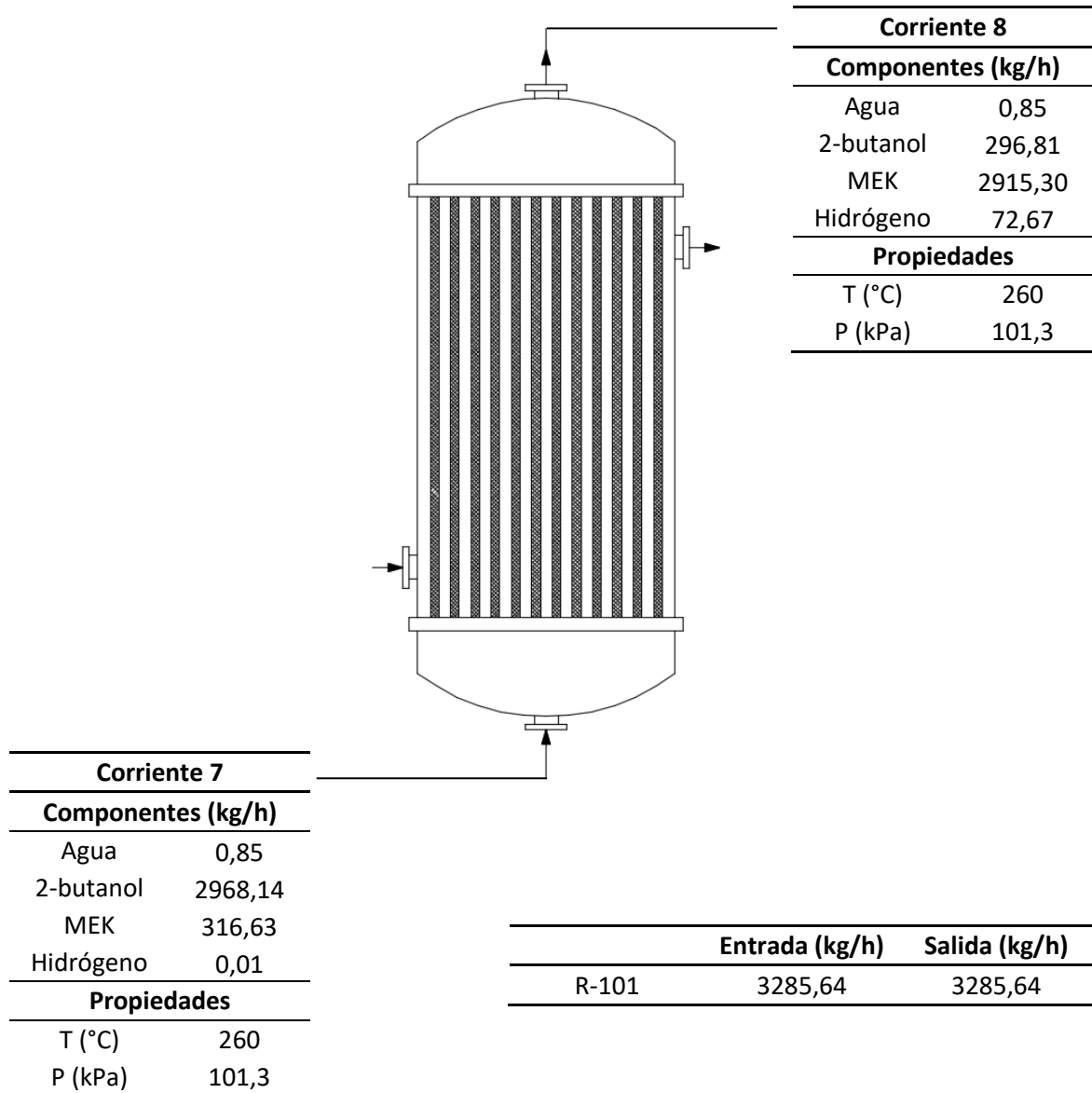
Tabla 1 - Balance de materia global

	<b>Entrada (kg/h)</b>	<b>Salida (kg/h)</b>
Agua	0,83	0,83
Butan-2-ol	2739,16	67,83
Butan-2-ona	0,00	2598,67
Hidrógeno	0,00	72,65
<b>TOTAL</b>	<b>2739,98</b>	<b>2739,98</b>

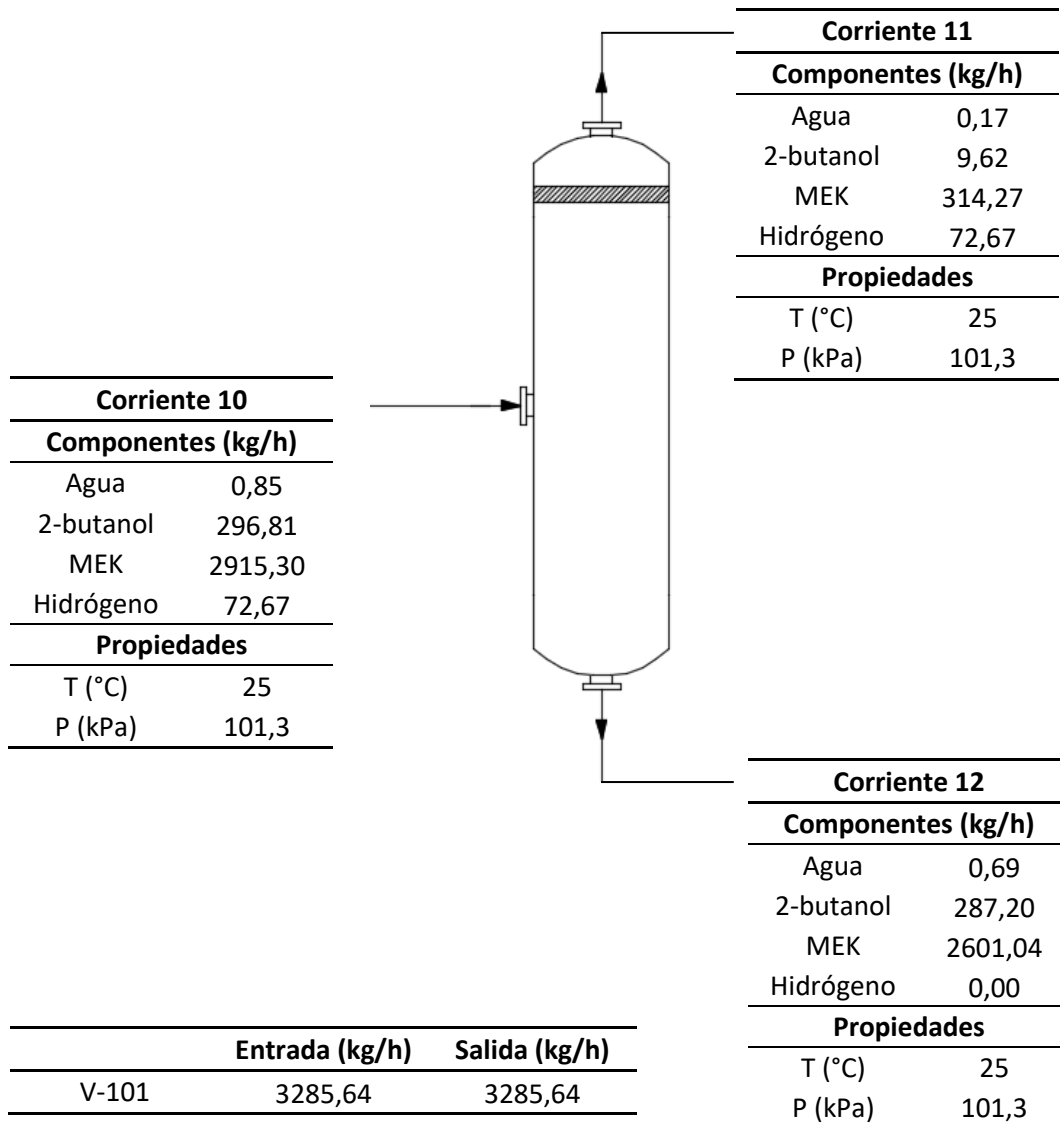
**1.2. Torre T-101**



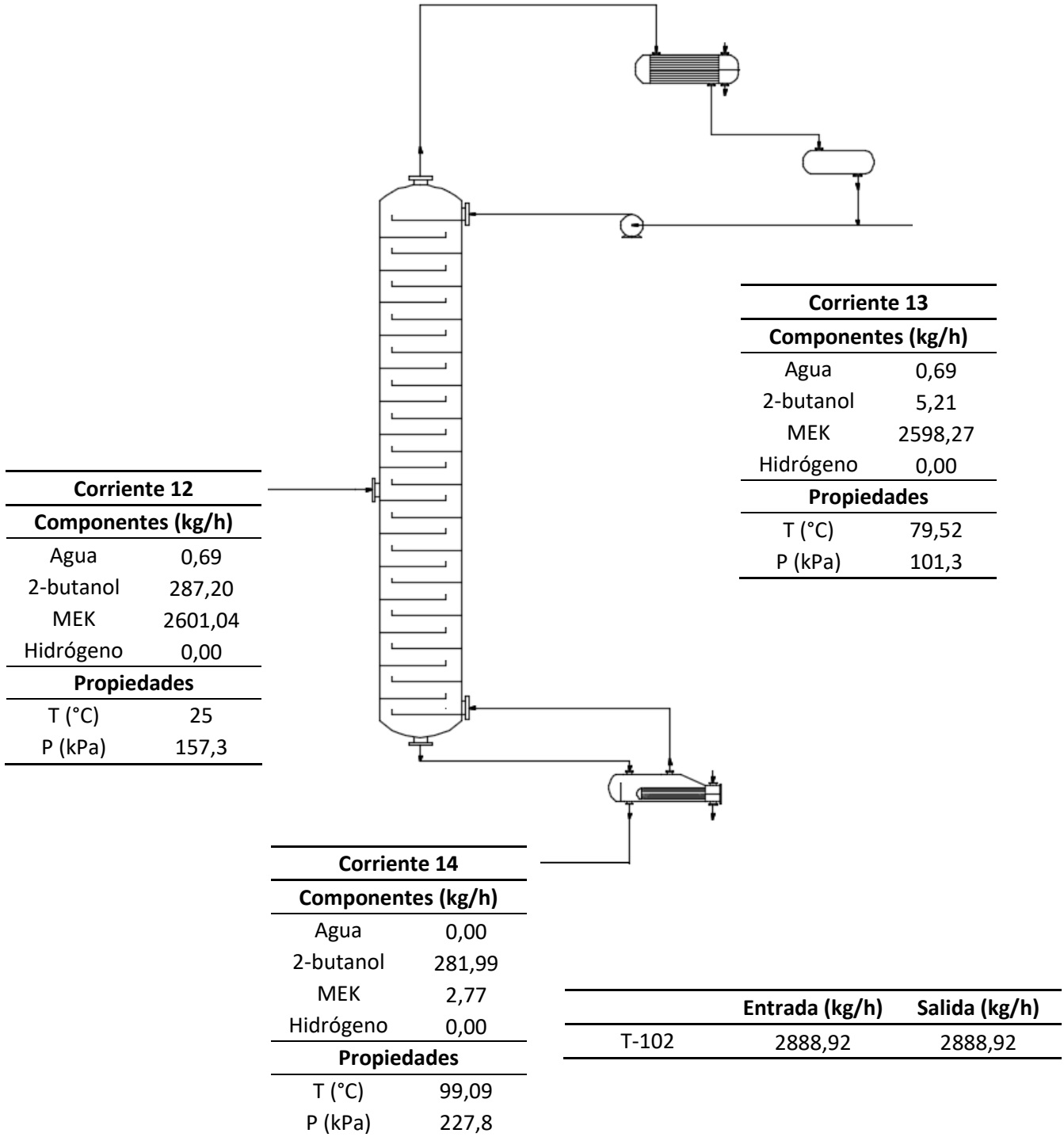
**1.3. Reactor R-101**



**1.4. Separador Líquido-Vapor V-101**



1.5. Torre de destilación T-102



## 2. Balances de energía

### 2.1. Columna de destilación T-102

El intercambio de calor en la columna de destilación T-102 tiene lugar en la caldera, identificada como el intercambiador E-105 y el condensador, identificado como E-106. Para realizar los balances de energía se van a utilizar los datos de flujos molares y entalpías molares de las corrientes calculados para el diseño riguroso de la columna, que se exponen en el apartado de cálculos justificativos.

Para el intercambiador E-105 (caldera), el balance de energía se puede expresar según la ecuación 1:

$$h_L * L + Q = H_v * V + B * h_B \quad (1)$$

Dónde:

- L es el flujo molar que entra a la caldera, kmol/h.
- $h_L$  es la entalpía molar de la corriente de líquido, kJ/kmol.
- V es el flujo molar de vapor recirculado a la columna, kmol/h.
- $H_v$  es la entalpía molar de la corriente de vapor, kJ/kmol.
- B es el flujo molar de la corriente de producto de colas.
- $h_b$  es la entalpía molar de la corriente de producto de colas, kJ/kmol.
- Q es el calor aportado.

En la tabla 1 se presentan los valores de las variables utilizadas en la ecuación 1, calculadas según lo expuesto en el apartado 1.7.1 del anexo de cálculos justificativos:

**Tabla 2 - Propiedades de las corrientes del intercambiador E-105**

Entalpía molar (kJ/kmol)		Flujo molar (kmol/h)	
$h_L$	21022,8	L	102,97
$H_v$	61237,0	V	99,13
$h_B$	21223,0	B	3,84

Con los que aplicando la ecuación 1, se obtiene el valor de Q, presentado en la tabla 3:

**Tabla 3 - Requerimientos de calor en E-105**

Q (kJ/h)	$3,987 \times 10^6$
----------	---------------------

## Anexo I: Balances de Materia y Energía

El procedimiento de cálculo para el condensador, identificado como E-105, es análogo. La ecuación 1 se puede reformular para representar el balance de energía, obteniendo la ecuación 2.

$$h_L * L + D * h_D = H_v * V + Q \quad (2)$$

Dónde:

- L es el flujo molar de la corriente de reflujo, kmol/h.
- $h_L$  es la entalpía molar de la corriente de reflujo, kJ/kmol.
- D es el flujo molar de la corriente de destilado, kmol/h.
- $h_D$  es la entalpía molar de la corriente de destilado, kJ/kmol.
- V es la corriente de vapor que entra al condensador, kmol/h.
- $H_v$  es la entalpía molar de la corriente de vapor que entra al condensador, kJ/kmol.

Los valores de estas variables se indican en la tabla 4, y se calculan según lo indicado en el apartado 1.7.1 de los cálculos justificativos.

**Tabla 4 - Propiedades de las corrientes del intercambiador 106**

Entalpía molar (kJ/kmol)		Flujo molar (kmol/h)	
$h_L$	12659,5	L	88,82
$H_v$	43935,0	V	124,96
$h_B$	12659,5	D	36,14

Con los que se puede aplicar la ecuación 2, para calcular el valor de Q, presentado en la tabla 5:

**Tabla 5 - Calor retirado del intercambiador E-106**

Q (kJ/h)	-3,908 x10 <sup>6</sup>
----------	-------------------------

Adicionalmente, cabe destacar que se consideran nulas las pérdidas de calor de la columna al medio, ya que gracias a la acción del aislante; cuyas características se especifican en el apartado de cálculos justificativos, deberían ser múltiples órdenes de magnitud inferiores a las cantidades retiradas y aportadas tanto en la caldera como en el condensador.

## 2.2. Reactor R-101

El reactor opera de forma isotérmica a 260 °C, y en él tiene lugar una reacción endotérmica con una entalpía estándar de  $\Delta H^\circ = 5,1 \times 10^4$  kJ/kmol, por lo que será necesario aportar energía al proceso.

Para calcular los requerimientos energéticos del reactor, dado que se dispone de la entalpía de reacción en condiciones estándar, se va a proceder a calcular la entalpía necesaria para enfriar los productos de reacción de 260 a 25 °C, y la entalpía para calentar los productos en el mismo rango de temperaturas. Con estos valores de variación de entalpía, se puede aplicar la ecuación 3 y 4 para calcular los requerimientos energéticos del reactor:

$$\Delta H = \Delta H_R + \Delta H_R^\circ + \Delta H_P \quad (3)$$

Dónde:

- $\Delta H_R$  es el cambio de entalpía de los reactivos, kJ/kmol.
- $\Delta H_P$  es el cambio de entalpía de los productos, kJ/kmol.
- $\Delta H_R^\circ$  es la entalpía estándar de reacción, kJ/kmol.

$$Q = \text{flujo molar reactivo} * \Delta H * \text{conversión} \quad (4)$$

Para calcular los cambios entálpicos de los productos y los reactivos se van a utilizar los datos de calor específico medio en fase líquida y entalpías de vaporización utilizadas en el diseño riguroso de la columna, que se detallan en el apartado 1.7.1 de los cálculos justificativos. Los valores de calor específico se obtienen de forma análoga, y se presentan en la tabla 6.

Tabla 6 - Datos de calor específico, entalpías de vaporización y temperaturas de ebullición

Compuesto	$C_{p\text{líquido}}$ (kJ/kmol °C)	$C_{p\text{gas}}$ (kJ/kmol °C)	$\lambda_{\text{vap}}$ (kJ/kmol)	T eb (°C)
Agua	75,77	36,27	46784,89	100,00
SBA	214,73	153,10	58113,48	99,50
MEK	159,18	135,45	44052,36	79,60
Hidrógeno	-	28,60	-	-

El cambio entálpico de los reactivos se puede calcular según la ecuación 5:

$$\Delta H_R = \sum x_i * \left( C_{p\text{gas}} * (T_{\text{eb},i} - 260) - \lambda_i + C_{p\text{líquido}} * (25 - T_{\text{eb},i}) \right) \quad (5)$$

Anexo I: Balances de Materia y Energía

Y el cambio entálpico de los productos, de forma análoga, según la ecuación 6:

$$\Delta H_p = \sum x_i * (Cp_{gas} * (260 - T_{eb,i}) + \lambda_i + Cp_{líquido} * (T_{eb,i} - 25)) \quad (6)$$

Dónde, para ambas ecuaciones:

- $X_i$  es la fracción molar del reactivo/producto.
- $Cp$  es el calor específico, bien en fase gas o líquida, kJ/kmol °C.
- $\lambda_i$  es la entalpía de vaporización del reactivo/producto, kJ/kmol.
- $T_{eb,i}$  es la temperatura de ebullición del reactivo/producto, °C.

Para el caso del hidrógeno, dado que permanece siempre en fase gas, únicamente aplica la primera parte de las ecuaciones 6 y 7.

Se necesitan adicionalmente las fracciones molares de cada compuesto en la corriente de reactivos y en la de productos, que se indican en la tabla 7

Tabla 7 - Fracciones molares

Compuesto	Fracción molar (reactivos)	Fracción molar (productos)
Agua	0,0011	0,0011
SBA	0,9001	0,0900
MEK	0,0987	0,9088
Hidrógeno	0,0001	0,8102

Se realizan los cálculos según el método expuesto, para obtener el cambio entálpico por mol de reactivo y producto, y los requerimientos energéticos horarios, que se indican en la tabla 8

Tabla 8 - Resultados del balance de energía al reactor

	Valor calculado
$\Delta H_R$ (kJ/kmol)	$-9,65 \times 10^4$
$\Delta H_p$ (kJ/kmol)	$8,51 \times 10^4$
$\Delta H_R^\circ$ (kJ/kmol)	$5,1 \times 10^4$
$\Delta H$ (kJ/kmol)	$3,96 \times 10^4$
Q (kJ/h)	$1,43 \times 10^6$

### 2.3. Intercambiador E-101

El intercambiador E-101 tiene como objetivo el aprovechamiento energético de la corriente de gases efluente del reactor, concretamente para precalentar la corriente de reactivos al mismo, antes de su vaporización. La corriente de reactivos es fundamentalmente butan-2-ol, con un punto de ebullición en el entorno de los 98-99 °C, por lo que se precalentará a 95 °C antes de enviarla al intercambiador E-102, donde se produce la vaporización completa de la corriente.

El requerimiento energético al intercambiador se puede calcular conocida el calor específico de la corriente a calentar, proporcionado por *Aspen Hysys*, según la ecuación 7.

$$Q = m * Cp * \Delta T \quad (7)$$

Dónde:

- m es el flujo másico de la corriente, en kg/h.
- Cp es el calor específico por unidad de masa, en kJ/kg °C.
- ΔT es el incremento de temperatura, en °C.

Las variables de la ecuación 7 y el resultado se indican en la tabla 9:

**Tabla 9 - Resultados para el intercambiador E-101**

Variable	Valor
m (kg/h)	3285,64
Cp (kJ/kg °C)	2,739
ΔT (°C)	57,37
Q (kJ/h)	5,16 x10 <sup>5</sup>

Para calcular la temperatura de salida de la corriente de gases efluentes del reactor, se utiliza la ecuación 7 de donde se despeja el incremento de temperatura, y por consiguiente, la temperatura de salida. Los valores de las variables y el resultado se indican en la tabla 10.

**Tabla 10 -Resultados para el intercambiador E-101**

Variable	Valor
m (kg/h)	3285,64
Cp (kJ/kg °C)	2,409
Q (kJ/h)	5,16 x10 <sup>5</sup>
T salida (°C)	194,77

### 2.4. Intercambiador E-102

La corriente de salida del intercambiador E-101 se alimenta al intercambiador E-102, donde se vaporiza de forma completa. La corriente se alimenta a 95 °C y entra en ebullición a 98,08 °C. Para calcular los requerimientos energéticos se va a desprestigiar el efecto de calor sensible para calentar estos 3 °C, y que es insignificante frente al calor latente de vaporización.

Para calcular los requerimientos energéticos se va a utilizar la ecuación 8

$$Q = \sum F_i * \lambda_i \quad (8)$$

Dónde los términos son análogos a las ecuaciones anteriores, excepto:

- $F_i$  son los flujos molares de cada componente, kmol/h.

Los valores de calor latente de vaporización son los mismos que los indicados en la tabla 6, y los flujos molares son los indicados en la tabla 11.

Tabla 11 - Flujos molares en el intercambiador E-102

Compuesto	Flujo molar (kmol/h)
Agua	0,047
SBA	40,044
MEK	4,391
Hidrógeno	0,007

Con estos datos se aplica la ecuación 8, y se obtiene el resultado expuesto en la tabla 12.

Tabla 12 - Calor aportado al intercambiador E-102

Q (kJ/h)	2,52 x10 <sup>6</sup>
----------	-----------------------

### 2.5. Intercambiador E-103

La corriente vaporizada, salida del intercambiador E-102 se alimenta al intercambiador E-103, donde se eleva su temperatura hasta la de reacción, de 260 °C. Los requerimientos energéticos se calculan mediante la ecuación 7, y los datos y el resultado se muestran en la tabla 13.

Tabla 13 – Resultados para el intercambiador E-103

Variable	Valor
m (kg/h)	3285,64
Cp (kJ/kg °C)	1,790
$\Delta T$ (°C)	161,92
Q (kJ/h)	9,52 x10 <sup>5</sup>

### 2.6. Intercambiador E-104

En el intercambiador E-104 se condensa totalmente la corriente de productos del reactor, y se enfría hasta 25 °C para eliminar de forma completa el hidrógeno presente en la corriente, y minimizar el arrastre de otros componentes, fundamentalmente la butan-2-ona.

El cálculo de los requerimientos energéticos se va a realizar de forma similar al cálculo del cambio entálpico en el reactor, con la ecuación 9, que es una modificación de la 5.

$$\sum F_i * (Cp_{gas} * (T_{eb,i} - 194,77) - \lambda_i + Cp_{liquido} * (25 - T_{eb,i})) \quad (9)$$

Dónde todos los términos son análogos a la ecuación 6, excepto  $F_i$  que representa el flujo molar de cada componente (kJ/kmol). Los datos utilizados para el cálculo se presentan en las tablas 14 y 15.

Tabla 14 - Datos para el intercambiador E-104

Compuesto	$Cp_{liquido}$ (kJ/kmol °C)	$Cp_{gas}$ (kJ/kmol °C)	$\lambda_{vap}$ (kJ/kmol)	T eb (°C)
Agua	75,77	36,27	46784,89	100,00
SBA	214,73	153,10	58113,48	99,50
MEK	159,18	135,45	44052,36	79,60
Hidrógeno	-	28,60	-	-

Tabla 15 - Flujos molares al intercambiador E-104

Compuesto	Flujo molar (kmol/h)
Agua	0,047
SBA	4,004
MEK	40,430
Hidrógeno	36,046

Y el resultado de requerimientos de refrigeración se muestra en la tabla 16.

Tabla 16 - Requerimientos de refrigeración para E-104

Q (kJ/h)	-3,31 x10 <sup>6</sup>
----------	------------------------

Planta de producción de Butan-2-ona

## Anexo II

Cálculos justificativos

## Índice

1.	Columna de destilación .....	4
1.1.	Generalidades .....	4
1.1.1.	Descripción del proceso .....	4
1.1.2.	Procedimiento genérico de diseño .....	5
1.1.3.	Reflujo .....	5
1.1.4.	Presión de operación.....	6
1.1.5.	Alimentación .....	6
1.2.	Sistema MESH .....	7
1.3.	Modelo termodinámico .....	8
1.4.	Columnas multicomponente: Diseño termodinámico .....	13
1.4.1.	Procedimiento de diseño .....	13
1.4.2.	Geddes-Hengstebeck: Distribución de compuestos no clave .....	13
1.4.3.	Número mínimo de etapas: Ecuación de Fenske .....	14
1.4.4.	Ratio de reflujo mínimo.....	15
1.4.5.	Estimación del punto de alimentación.....	15
1.4.6.	Estimación del número de etapas.....	16
1.4.7.	Cálculos etapa a etapa: condensador-alimentación .....	17
1.4.8.	Cálculos etapa a etapa: caldera-alimentación: .....	21
1.4.9.	Cálculos etapa a etapa: Convergencia de la alimentación.....	23
1.5.	Diseño hidráulico.....	24
1.5.1.	Platos de contacto: tipos y selección .....	24
1.5.2.	Patrones de flujo: tipos y selección.....	25
1.5.3.	Procedimiento genérico de diseño: .....	25
1.5.4.	Procedimiento de cálculo.....	26
1.6.	Diseño mecánico .....	34
1.6.1.	Consideraciones generales.....	34

## Anexo II: Cálculos Justificativos

1.6.2.	Procedimiento genérico .....	35
1.6.3.	Espesor de carcasa requerido por presión.....	35
1.6.4.	Diseño de los cabezales.....	36
1.6.5.	Análisis de esfuerzos en el fondo de la columna .....	37
1.6.6.	Diseño del soporte de la columna.....	41
1.7.	Columna de destilación T-102:.....	43
1.7.1.	Datos de entalpía: .....	43
1.7.2.	Especificaciones de la corriente de alimentación .....	44
1.7.3.	Especificación de las corrientes de producto: Geddes-Hengstebeck .....	45
1.7.4.	Número mínimo de etapas .....	48
1.7.5.	Reflujo mínimo .....	48
1.7.6.	Localización de la alimentación.....	48
1.7.7.	Correlación de Erbar-Maddox .....	49
1.7.8.	Simulación preliminar .....	49
1.7.9.	Cálculos etapa a etapa .....	53
1.7.10.	Perfiles de la columna .....	65
1.7.11.	Diseño hidráulico.....	69
1.7.12.	Diseño mecánico .....	75
	Bibliografía .....	80

## 1. Columna de destilación

A continuación se expone el procedimiento de diseño seguido para la columna de destilación T-102.

### 1.1. Generalidades

La destilación es la operación de separación por excelencia en la industria química, permitiendo separar de forma sencilla y económica mezclas líquidas, con el objetivo de obtener una corriente de cabezas rica en los compuestos más volátiles, y una corriente de colas rica en los compuestos más pesados.

La destilación se ve posibilitada por las diferencias en la volatilidad de los componentes a separar. Cuanto mayor sea la diferencia de volatilidad de los compuestos en la mezcla, más sencilla será la separación.

#### 1.1.1. Descripción del proceso

En el interior de la columna se produce el contacto en contracorriente entre una fase vapor ascendente, generada por la caldera, y una líquida descendente procedente del condensador. El contacto se ve facilitado bien por los platos, o por el relleno; según el tipo de columna. En una columna de platos cada uno constituye una etapa de equilibrio, donde idealmente las corrientes salientes de vapor y líquido se encuentran en equilibrio termodinámico.

La columna de destilación se ve dividida por la alimentación en dos secciones. Por debajo de ella, se encuentra la sección de agotamiento, donde se retiran los componentes volátiles de la fase líquida por contacto con la fase vapor. Por encima, se encuentra la sección de rectificación, o rectificación, donde el vapor se enriquece en componentes volátiles. A mayores, pueden existir múltiples alimentaciones o corrientes laterales; según las necesidades de la separación.

Al llegar a la parte superior de la columna, el vapor entra al condensador, que puede ser de dos tipos:

- Condensador total: la totalidad de la corriente de vapor pasa a fase líquida, con lo que se mantiene la misma composición. Una parte de esta corriente, determinada según el reflujo, se recircula a la columna.
- Condensador parcial: solo una fracción de la corriente vapor pasa a fase líquida, con lo que se obtiene una composición diferente en equilibrio con la fase vapor. Una fracción, o la totalidad de la corriente condensada se recircula a la columna.

De forma análoga, la corriente líquida que llega al fondo de la columna pasa a un rehervidor, que pasa a fase vapor una fracción de la corriente, o a un vaporizador, que la evapora de forma completa. Generalmente se utilizan rehervidores que pueden ser de los siguientes tipos:

- Circulación forzada: La corriente líquida a vaporizar se bombea a través del intercambiador.
- Termosifón: Constituido por una serie de tubos verticales en los que se produce la evaporación. La circulación del fluido es natural, gracias a las diferencias de densidades entre la mezcla bifásica líquido-vapor y el líquido saturado que sale de la columna.
- *Kettle*: La evaporación tiene lugar en una piscina en la que se encuentra sumergido un haz de tubos. No hay circulación del líquido. Existe un caso especial en el que se puede incorporar el haz de tubos en el interior de la columna.

### 1.1.2. Procedimiento genérico de diseño

El diseño de una columna de destilación presenta una serie de requerimientos que se deben definir secuencialmente [1]:

1. Especificaciones de productos: grado de separación requerido.
2. Condiciones de operación: presión, operación en continuo o *batch*.
3. Tipo de sistema de contacto: platos o relleno.
4. Número de etapas de equilibrio y reflujo
5. Dimensionado de la columna: número de etapas reales, diámetro.
6. Diseño hidráulico: platos, o distribuidores y soportes de relleno
7. Diseño mecánico: Recipiente y elementos internos.

### 1.1.3. Reflujo

El ratio de reflujo  $R$  se define como:

$$R = \frac{\text{Flujo retornado a la columna}}{\text{flujo de producto de cabezas}} \quad (1)$$

El ratio de reflujo tiene influencia sobre el número de etapas requeridas para alcanzar la separación requerida, al aumentar el ratio de reflujo, disminuye el número de etapas requeridas. Por tanto, el reflujo puede encontrarse entre dos valores:

- Reflujo mínimo: Ratio de reflujo teórico para un número infinito de etapas de separación. Es el mínimo reflujo que posibilita el grado de separación requerido.

- Reflujo total: Cuando se recircula la totalidad de la corriente saliente de la última etapa de la columna. A reflujo total, el número de etapas requerido para la separación deseada es mínimo.

El valor óptimo del reflujo se encuentra entre estos dos valores, y viene determinado por el mínimo coste total que permite obtener la separación requerida. Al aumentar el reflujo, disminuye el número de platos requeridos (costes fijos), pero aumentan los requerimientos en la caldera y el condensador (costes de operación).

Típicamente, el ratio de reflujo se encuentra entre 1.2 y 1,5 veces el reflujo mínimo. El efecto del valor del reflujo se puede estudiar con métodos aproximados antes de proceder al diseño riguroso de la columna.

#### **1.1.4. Presión de operación**

El principal factor que condiciona la selección de la presión de operación de la columna es la temperatura de rocío de los componentes en el condensador, que condiciona la selección del refrigerante. Para poder utilizar la opción más económica, agua de refrigeración, el condensador debe operar a una temperatura superior a los 30°C, ya que el agua de refrigeración típicamente se encuentra a 25-30°C. Si se requieren presiones demasiado altas o si los compuestos son termolábiles, se debe estudiar la utilización de refrigerantes como agua refrigerada (hasta los 10°C). Para compuestos altamente volátiles se trabaja a vacío, con refrigerantes como salmuera (hasta -30°C) o ciclos de refrigeración con fluidos específicos para temperaturas inferiores.

#### **1.1.5. Alimentación**

La posición de la alimentación dentro de la columna tiene influencia en el número de etapas necesarias. De forma general, la altura óptima es la del plato que presente una composición similar a la alimentación.

## 1.2. Sistema MESH

Para cada plato de una columna de destilación existe un sistema de 4 ecuaciones denominado MESH (siglas en inglés de *Material balance* (balance de materia), *Equilibrium* (equilibrio), *Summation* (suma) y *Heat* (calor, balance de energía)), que permiten la resolución rigurosa de la columna. A continuación se detallan las ecuaciones:

Para un plato genérico n de una columna de destilación (figura 1), sin posibles corrientes laterales, se pueden formular los siguientes balances de materia y energía:

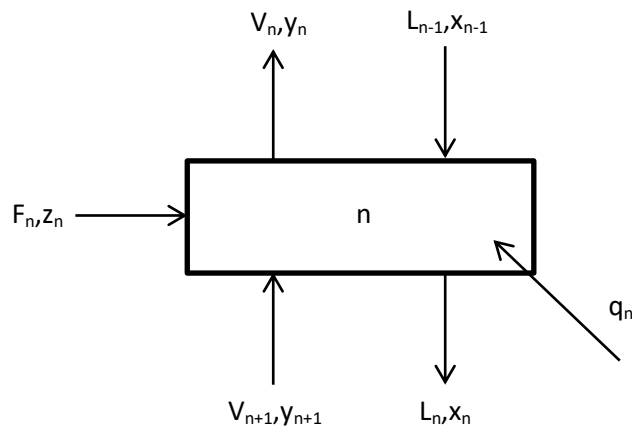


Figura 1 - Plato genérico (adaptado de [1])

balance de materia por componente:

$$F_n * z_n + V_{n+1} * y_{n+1} + L_{n-1} * x_{n-1} = V_n * y_n + L_n * x_n \quad (2)$$

balance de energía:

$$F_n * h_f + V_{n+1} * H_{n+1} + L_{n-1} * h_{n-1} + q_n = V_n * H_n + L_n * h_n \quad (3)$$

donde los términos son:

- V : flujo molar de vapor, kmol/h.
- L: flujo molar de líquido, kmol/h.
- x: fracción molar de componente en la fase líquida.
- y: fracción molar de componente en la fase vapor.
- z: fracción molar global de la alimentación.
- h: entalpía molar de la fase líquida, kJ/kmol.
- h<sub>f</sub>: entalpía molar de la alimentación, kJ/kmol.
- H: entalpía molar de la fase vapor, kJ/kmol.

y los subíndices:

- n: relativo al plato al que se realiza el balance.
- n-1: relativo al plato precedente o superior.
- n+1: relativo al plato siguiente o inferior.

También se añaden las ecuaciones de suma para las composiciones de las fases líquida y vapor:

$$\sum x_{i,n} = \sum y_{i,n} = 1 \quad (4)$$

Y por último las relaciones de equilibrio, que vienen dadas por las constantes de equilibrio K para cada componente a través de la ecuación:

$$y_i = K_i * x_i \quad (5)$$

El cálculo de las constantes de equilibrio depende del modelo termodinámico elegido para representar el sistema, que se discute en el siguiente apartado.

### 1.3. Modelo termodinámico

Dentro del proceso se manejan mezclas de un alcohol, una cetona y agua, lo cual indica la posible existencia de azeótropos. Adicionalmente, al tratarse de un alcohol y cetona de 4 carbonos, existe una región de inmiscibilidad con el agua. Para obtener cierta información preliminar acerca del comportamiento del sistema, se realiza un diagrama ternario a 35°C y 1 atm (figura 2) con ayuda del software informático *Aspen Properties*, utilizando para la predicción el modelo termodinámico NRTL, adecuado para sistemas con de regiones de inmiscibilidad y equilibrio líquido-líquido.

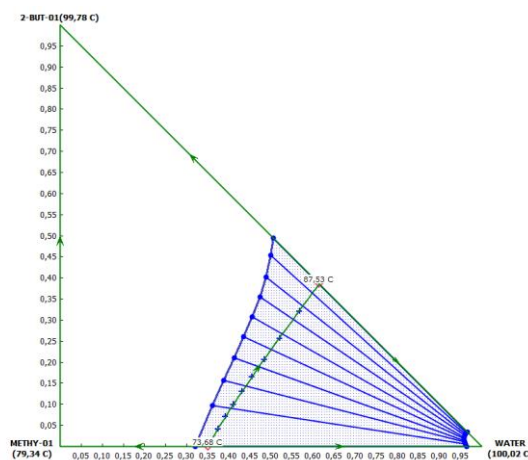


Figura 2 – Diagrama líquido-líquido ternario para el sistema a 35°C y 1 atm, *Aspen Properties*

## Anexo II: Cálculos Justificativos

El software predice una región de inmiscibilidad en la zona rica en agua, y dos azeótropos para las mezclas butan-2-ol/agua y butan-2-ona/agua, que se muestran en la tabla 1, junto con una comparativa de fuentes bibliográficas.

**Tabla 1 - Comparativa para los azeótropos**

Mezcla	Aspen Properties		CRC Handbook/Langue's	
	x Agua	T (°C)	x Agua	T (°C)
Agua/butan-2-ol	0,6143	87,53	0,601	87
Agua/butan-2-ona	0,3505	73,68	0,33	73,5

Por tanto, no es asumible la idealidad en la fase líquida, y será necesario utilizar un modelo que permita estimar los coeficientes de actividad. Por el contrario, la idealidad si es asumible para la fase vapor, dado que la presión de trabajo es de aproximadamente 1 atmósfera. Por lo tanto, el equilibrio se formulará a partir de la ley de Raoult modificada, que toma la forma:

$$y_i * P = \gamma_i * P_i^{sat} * x_i \quad (6)$$

Donde las presiones de saturación se calculan a través de la ecuación de Antoine, de la forma:

$$\ln P_i^{sat} = A_i - \frac{B_i}{T - C_i} \quad (7)$$

para la cual los parámetros, y sus temperaturas mínimas y máximas de aplicación se presentan en la tabla 2. Se han tomado de [2], con la ecuación en °C y kPa:

**Tabla 2 - Parámetros de Antoine**

Componente	Parámetros de Antoine [2]				
	A	B	C	T min (°C)	Tmax (°C)
Agua	16,3872	3885,7	230,17	0	200
SBA	15,1989	3026,03	186,5	25	120
MEK	14,1334	2838,24	218,69	-8	103

Dado que la alimentación a la planta es SBA prácticamente anhidro, el sistema nunca se va a encontrar en la región en la que aparecen 2 fases líquidas, por lo que se va a utilizar la ecuación de Wilson para predecir los coeficientes de actividad. La ecuación de Wilson permite una mejor predicción que las de Margules o Van Laar para sistemas con alta desviación de la idealidad, y además facilita la predicción de sistemas multicomponente a partir de datos de interacción extraídos de los sistemas binarios [1].

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Para un sistema binario, la ecuación toma la forma:

$$\ln \gamma_i = -\ln(x_i + x_j * \Delta_{ij}) + x_j * \left( \frac{\Delta_{ij}}{x_i + x_j * \Delta_{ij}} - \frac{\Delta_{ji}}{x_j + x_i * \Delta_{ji}} \right) \quad (8)$$

y para un sistema multicomponente:

$$\ln \gamma_i = 1 - \ln \left( \sum_{j=1}^m x_j * \Delta_{ij} \right) - \sum_{k=1}^m \frac{x_k * \Delta_{ki}}{\sum_{j=1}^m x_j * \Delta_{kj}} \quad (9)$$

dónde:

- $\gamma_i$ : coeficiente de actividad del componente i en la mezcla.
- $x_i, x_j$ : fracciones molares de ambos componentes.
- $\Delta_{ij}, \Delta_{ji}$ : coeficientes de interacción de Wilson para el par de componentes.

Los coeficientes se han tomado de [3], y se muestran en la tabla 3:

**Tabla 3 - Parámetros de interacción de Wilson para el sistema**

<b>Wilson <math>\Delta_{ij}</math> [3]</b>			
	Agua	butan-2-ol	butan-2-ona
Agua	1	0,67942	0,30482
butan-2-ol	0,01572	1	0,65639
butan-2-ona	0,03790	1,01136	1

Con los datos presentados, se puede proceder a la determinación de las curvas de equilibrio para los sistemas binarios. Para ello, se selecciona una presión (la presión de trabajo, 1 atm), y se cubre todo el intervalo de valores posibles de composición en la fase líquida. Para cada uno de los puntos de composición en la fase líquida conocida, se realiza un cálculo iterativo de temperatura de burbuja. El procedimiento es el siguiente:

- Se calculan las temperaturas de saturación de ambos compuestos puros a la presión de trabajo.
- Se determinan los coeficientes de actividad mediante la ecuación 8.
- Se calcula una temperatura supuesta como:

$$T = x_i * T_i^{sat} + x_j * T_j^{sat} \quad (10)$$

- Se calculan las presiones de saturación de ambos compuestos puros a la temperatura supuesta a través de la ecuación 7.

## Anexo II: Cálculos Justificativos

- Se calcula una nueva presión de saturación para uno de los componentes como:

$$P_i^{sat'} = \frac{P}{x_i * \gamma_i + x_j * \gamma_j * P_i^{sat T} / P_j^{sat T}} \quad (11)$$

- A esta nueva presión de saturación, se calcula la temperatura de saturación a través de la ecuación 7, y se utiliza como nueva temperatura supuesta, iterando hasta la convergencia.
- Se determina el valor de composición de equilibrio en la fase vapor mediante la ecuación 6.

Así se obtienen los diagramas de equilibrio para los 3 sistemas binarios, figuras 3, 4 y 5:

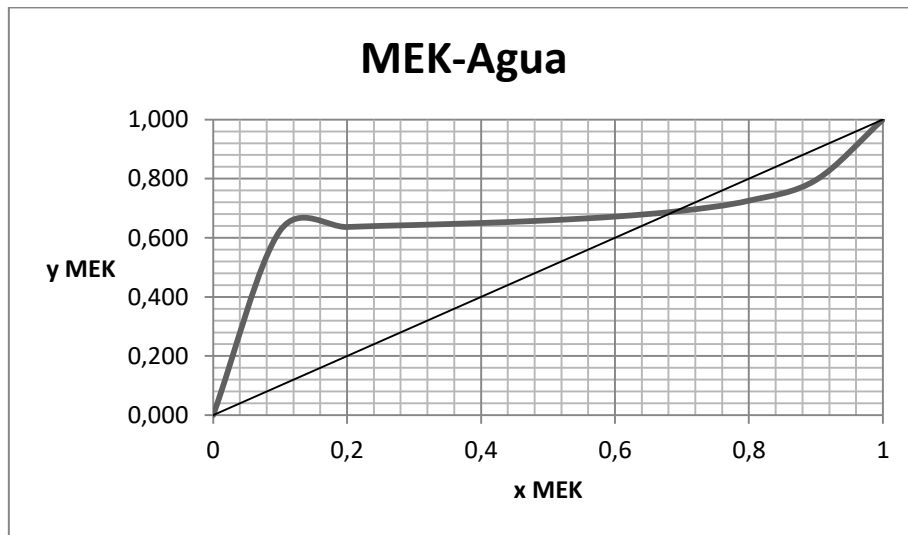


Figura 3- Diagrama x-y para el sistema MEK-Agua a 1 atm

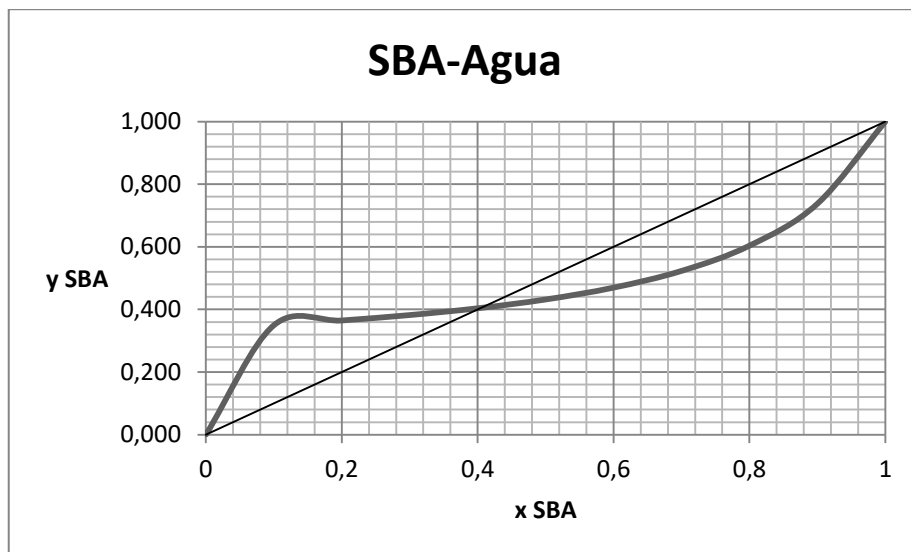


Figura 4 - Diagrama x-y para el sistema SBA-Agua a 1 atm

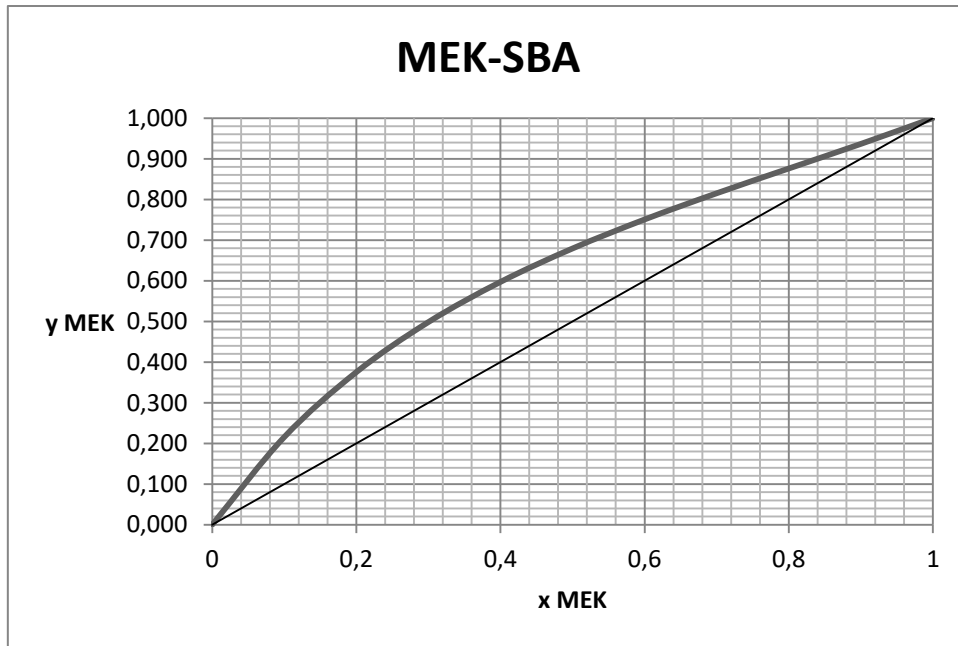


Figura 5 - Diagrama x-y para el sistema MEK-SBA a 1 atm

Cuyos valores de composición y temperatura se representan en la tabla 4:

Tabla 4 - Datos de equilibrio de los sistemas binarios

SBA/Agua			MEK/Agua			MEK/SBA		
x SBA	y SBA	T (°C)	x MEK	y MEK	T (°C)	x MEK	y MEK	T (°C)
0	0	100,00	0	0	100,00	0	0	99,50
0,10	0,35	88,80	0,10	0,62	75,33	0,10	0,22	95,76
0,20	0,36	88,44	0,20	0,64	74,68	0,20	0,38	92,70
0,30	0,38	88,21	0,30	0,64	74,40	0,30	0,50	90,16
0,40	0,40	88,11	0,40	0,65	74,17	0,40	0,60	88,02
0,50	0,43	88,21	0,50	0,66	73,97	0,50	0,68	86,19
0,60	0,47	88,61	0,60	0,67	73,80	0,60	0,75	84,59
0,70	0,52	89,46	0,70	0,69	73,73	0,70	0,82	83,17
0,80	0,60	91,05	0,80	0,73	73,95	0,80	0,88	81,88
0,90	0,74	93,96	0,90	0,80	75,05	0,90	0,94	80,70
1	1	99,50	1	1	79,60	1	1	79,60

Se encuentra por tanto una predicción adecuada del equilibrio del sistema, siempre que el punto en cuestión se encuentre en la región de miscibilidad total.

### 1.4. Columnas multicomponente: Diseño termodinámico

El diseño de una columna de separación de mezclas multicomponente es significativamente más complejo que la de una mezcla binaria. Esto se debe fundamentalmente a que en una mezcla multicomponente no es suficiente conocer la fracción molar de uno de los compuestos para que esta esté definida, lo cual conlleva una mayor complejidad en el cálculo. Además, no es posible especificar por completo las corrientes de destilado y producto de colas.

La especificación del grado de separación requerido se realiza a través de la definición de dos compuestos clave: el compuesto clave ligero, que se desea retirar de la corriente de fondos, y el compuesto clave pesado, que no debe aparecer en el destilado. Para cada uno de estos compuestos se establece una fracción molar máxima, que será las que aparezcan en sus respectivas corrientes.

#### 1.4.1. Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño viene dado, en líneas generales, por los siguientes pasos:

1. Especificación de la corriente de alimentación.
2. Especificación de los compuestos clave.
3. Estimación del reparto de los compuestos no clave.
4. Estimación del número de etapas y reflujo mínimo.
5. Selección del punto de alimentación.
6. Cálculos etapa a etapa: condensador-alimentación y caldera-alimentación.
7. Iteración hasta convergencia

#### 1.4.2. Geddes-Hengstebeck: Distribución de compuestos no clave

Es un procedimiento gráfico basado en la ecuación de Fenske que permite estimar la distribución de los compuestos no clave entre las corrientes de destilado y producto de colas.

La ecuación de Fenske se puede reescribir de la forma:

$$\log \left( \frac{d_i}{b_i} \right) = A + C * \log \alpha_i \quad (12)$$

dónde:

- $d_i$ : flujo molar del componente  $i$  en el destilado, kmol/h.
- $b_i$ : flujo molar del componente  $i$  en el producto de colas, kmol/h
- $\alpha_i$ : volatilidad relativa del componente  $i$  respecto al clave pesado.
- $A, C$ : constantes adimensionales.

Las constantes A y C se determinan a partir de la distribución especificada para el componente clave ligero, y el componente clave pesado. Una vez conocidas, se puede estimar la distribución de los demás componentes y resolver el balance de materia.

Las volatilidades relativas se estiman inicialmente a la temperatura de burbuja de la corriente de alimentación, que da una primera estimación adecuada de la temperatura media de la columna. Posteriormente, se calculan las volatilidades relativas en el punto de rocío de la corriente de cabezas, y en el punto de burbuja de la corriente de colas, y se determina la media geométrica de ambas, iterando hasta la convergencia.

### 1.4.3. Número mínimo de etapas: Ecuación de Fenske

La ecuación de Fenske estima el número mínimo de etapas necesarias para la separación requerida, que como ya se indicó en apartados anteriores, se corresponde con la operación a reflujo total.

La ecuación de Fenske se deriva para un sistema binario, pero es válida igualmente sistemas ternarios, tomando la forma:

$$\left[ \frac{x_i}{x_r} \right]_d = \alpha_i^{N_m} * \left[ \frac{x_i}{x_r} \right]_b \quad (13)$$

dónde:

- $[x_i/x_r]$ : son los ratios entre la composición de un componente cualquiera y otro de referencia (generalmente el pesado clave), para la corriente de destilado (sufijo d) y de fondos (sufijo b, por el inglés *bottoms*).
- $N_m$ : es el número mínimo de etapas, incluyendo el *reboiler*.
- $\alpha_i$ : es la volatilidad relativa del componente i con respecto al de referencia.

La ecuación se puede reescribir como:

$$N_m = \frac{\log \left( \left[ \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right]_d * \left[ \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right]_b \right)}{\log \alpha_{LK}} \quad (14)$$

donde los sufijos LK y HK hacen referencia al componente clave ligero (*light key*) y al clave pesado (*heavy key*). La volatilidad relativa, al igual que en el apartado anterior, se calcula como la media geométrica entre las volatilidades en el punto de rocío de la corriente cabezas y en el punto de burbuja de la de colas.

#### 1.4.4. Ratio de reflujo mínimo

El ratio mínimo de reflujo para un sistema multicomponente se puede estimar a través de la ecuación de Underwood, de la forma:

$$\sum \frac{\alpha_i * x_{i,d}}{\alpha_i - \theta} = R_m - 1 \quad (15)$$

donde  $\alpha_i$  es análogo al de la ecuación de Fenske, y el resto de términos:

- $R_m$ : reflujo mínimo para la operación requerida.
- $X_{i,d}$ : fracción molar del componente i en el destilado.
- $\Theta$ : parámetro calculado por iteración a partir de la ecuación:

$$\sum \frac{\alpha_i * x_{i,f}}{\alpha_i - \theta} = 1 - q \quad (16)$$

dónde:

- $X_{i,f}$ : fracción molar del componente i en la alimentación.
- $q$ : es la calidad de la corriente de alimentación (entalpía de vaporización de 1 mol de alimentación/entalpía molar de la alimentación).

Estrictamente, las volatilidades relativas utilizadas para la derivación de la ecuación son aquellas determinadas por la media geométrica entre las corrientes de cabezas y de colas en la situación de reflujo mínimo, a pesar de ello, una estimación aceptable es la obtenida con las mismas volatilidades relativas utilizadas en la ecuación de Fenske.

#### 1.4.5. Estimación del punto de alimentación

El punto de alimentación se puede estimar a través de la ecuación de Kirkbride, que toma la forma:

$$\log \left[ \frac{N_r}{N_s} \right] = 0,206 * \log \left[ \left( \frac{B}{D} \right) * \left( \frac{x_{f,HK}}{x_{f,LK}} \right) * \left( \frac{x_{b,LK}}{x_{d,HK}} \right)^2 \right] \quad (17)$$

donde los sufijos f,b,d, LK y HK son análogos a los detallados en la ecuación de Fenske, y:

- $N_r$ : Número de etapas en sobre el punto de alimentación.
- $N_s$ : Número de etapas bajo el punto de alimentación.
- $B$ : flujo molar de colas, kmol/h.
- $D$ : flujo molar del destilado, kmol/h.

### 1.4.6. Estimación del número de etapas

Una vez obtenido el número de etapas mínimo (a reflujo total) y el reflujo mínimo, se selecciona una estimación inicial para el reflujo de operación (como ya se mencionó anteriormente, entre 1,2 y 1,5 veces el reflujo mínimo como regla general). Con estos tres datos y la ayuda de una correlación, se puede estimar el número de etapas ideales requerido. Las dos correlaciones utilizadas generalmente son las de Gilliland (1940) y Erbar y Maddox (1961). En este caso, se va a utilizar la correlación de Erbar y Maddox, ya que es más reciente y generalmente se considera que proporciona mejores predicciones [1].

La correlación se presenta de forma gráfica en la figura 6.

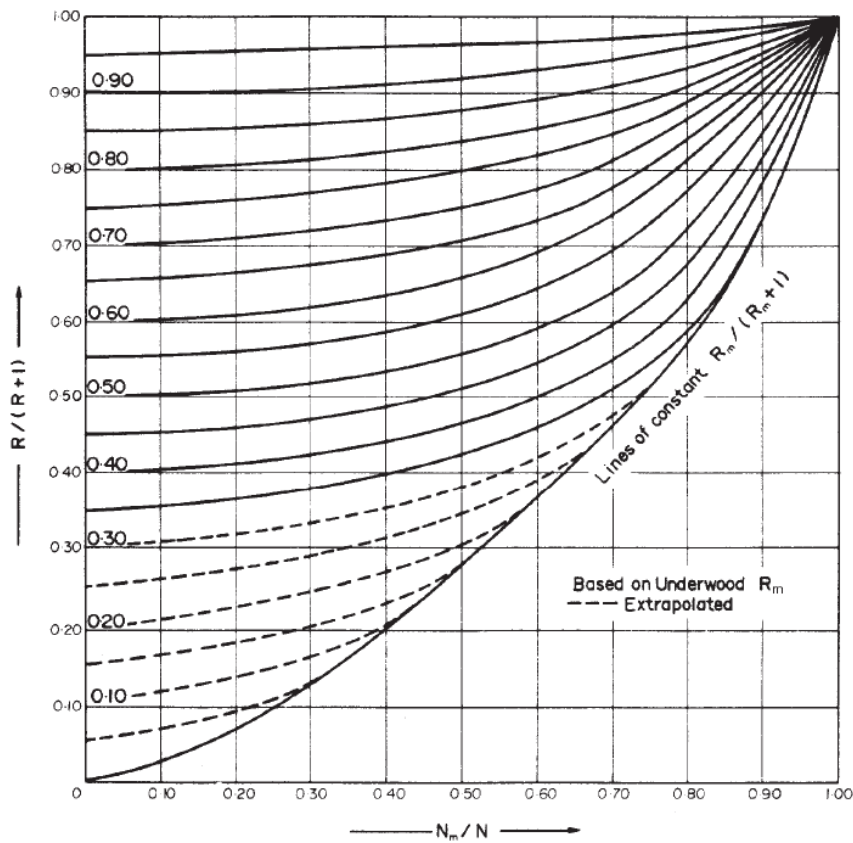


Figura 6 -Correlación de Erbar y Maddox para el número de etapas de equilibrio [1]

Se lee sobre el eje y el valor de cociente  $R/(R+1)$ , donde  $R$  es la relación de reflujo de operación, y se busca la intersección de la línea horizontal a ese valor con la curva con el valor de  $R_m/(R_m+1)$ , donde  $R_m$  es el reflujo mínimo. De este punto de intersección se traza una horizontal al eje x, y se lee el coeficiente  $N_m/N$ , donde  $N_m$  es el número mínimo de etapas de equilibrio, y  $N$  es el número estimado por la correlación.

### 1.4.7. Cálculos etapa a etapa: condensador-alimentación

Una vez realizados los métodos de estimación para la columna, se tiene una idea de la distribución de los compuestos no clave, y del reflujo necesario. Esto permite comenzar a realizar el cálculo etapa a etapa. En la columna diseñada, el condensador es total, y se puede plantear un balance al mismo, y al primer plato de la columna, presentados en la figura 7.

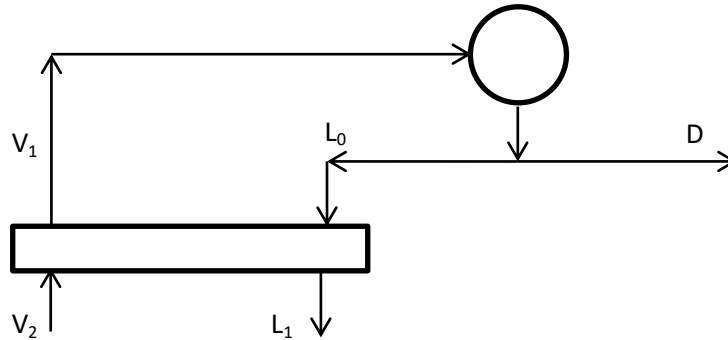


Figura 7 - Flujos al primer plato y al condensador (elaboración propia)

Conocido el caudal de destilado  $D$  y la relación de reflujo  $R$ , se calculan los flujos de las corrientes  $V_1$  y  $L_0$ :

$$L_0 = R * D \quad (18)$$

$$V_1 = L_0 + D \quad (19)$$

Al tratarse de un condensador total no existe etapa de equilibrio, por lo que las composiciones de ambas corrientes ( $y_{i,1}$  y  $x_{i,0}$ ) son iguales a las de la corriente de destilado. Se puede proceder por tanto a determinar la temperatura del plato, y la concentración de la corriente líquida  $L_1$ . Para ello, se va a realizar un cálculo de temperatura de rocío a la corriente  $V_1$ , que se detalla a continuación:

- Se calculan las temperaturas de saturación de los compuestos puros ( $T_i^{sat}$ ) a la presión de operación con la ecuación 7.
- Se estima la temperatura de rocío como:

$$T = \sum_i x_i * T_i^{sat} \quad (20)$$

- Se calculan las presiones de saturación de los compuestos puros ( $P_i^{sat}$ ) a través de la ecuación 7.

## Anexo II: Cálculos Justificativos

- Para iniciar la iteración, se consideran todos los coeficientes de actividad  $\gamma_i$  iguales a 1.
- Se calculan las fracciones molares en el líquido  $x_i$  aplicando la ley de Raoult modificada, ecuación 6.
- Se normalizan las composiciones en la fase líquida, mediante la expresión:

$$x_{i, \text{ normalizado}} = \frac{x_i}{\sum x_i} \quad (21)$$

- Se recalculan los coeficientes de actividad  $\gamma_i$  mediante la ecuación 9.
- Se recalcula la presión de saturación de uno de los componentes como:

$$P_j^{sat} = P * \sum_i \frac{y_i}{\gamma_i} * \left( \frac{P_j^{sat}}{P_i^{sat}} \right) \quad (22)$$

- A partir del valor de la presión obtenido mediante la ecuación 22 se recalcula la temperatura de saturación del componente elegido (ecuación 7), que se utiliza como nueva estimación. Se vuelve a iniciar la iteración, esta vez sin fijar los coeficientes de actividad a la unidad, utilizando en su lugar los obtenidos en la iteración anterior.

A continuación se determina la primera estimación de la composición de la corriente de vapor incidente al plato,  $V_2$ . Para ello se va a considerar que los flujos molares permanecen constantes, por lo que el balance de materia se puede replantear como:

$$y_2 = \frac{L_0}{V_1} * (x_0 - x_1) + y_1 \quad (23)$$

A partir de esta composición, se puede realizar un cálculo de temperatura de rocío análogo al de la corriente  $V_1$ , obteniéndose una estimación de la temperatura de la corriente  $V_2$ .

Posteriormente, se abandona la suposición de flujos molares constantes y se calculan los valores de  $L_1$  y  $V_2$  que satisfagan simultáneamente el balance de materia y el balance de energía, adaptaciones de las ecuaciones 2 y 3, que toman la forma:

$$V_1 + L_1 = L_0 + V_2 \quad (24)$$

$$V_1 * H_1 + L_1 * h_1 = L_0 * h_0 + V_2 * H_2 \quad (25)$$

Para ello es necesario determinar las entalpías de todas las corrientes, para lo que se requiere conocer sus composiciones y sus temperaturas. En el caso del primer plato, esto supone un paso adicional ya que hay que realizar un cálculo de temperatura de burbuja al destilado para

conocer la temperatura de la corriente  $L_0$ . El cálculo de temperatura de burbuja es similar al de temperatura de rocío, y se detalla a continuación:

- Se calculan las temperaturas de saturación de los compuestos puros ( $T_i^{sat}$ ) a la presión de operación, ecuación 7.
- Se estima la temperatura de burbuja mediante la ecuación 20.
- Se calculan las temperaturas de saturación de los compuestos puros mediante la ecuación 7.
- Se determinan los coeficientes de actividad  $\gamma_i$  mediante la ecuación 9, que permanecen constantes entre iteraciones.
- Se determinan las presiones de saturación de los componentes puros ( $P_i^{sat}$ ) a la temperatura estimada mediante la ecuación 7.
- Se recalcula la presiones de saturación para uno de los componentes a través de la ecuación 10.
- Se obtiene una nueva estimación de la temperatura mediante la ecuación 7, que se usa para iniciar una nueva iteración análoga.

Finalizado el cálculo, se conocen todas las temperaturas y composiciones de las corrientes, y se pueden calcular las entalpías. Para una corriente líquida, de la forma:

$$h_l = \sum x_i * C_{p,i} * (T - T_{ref}) \quad (26)$$

y para una corriente vapor:

$$H_v = \sum x_i * C_{p,i} * (T_{ebullición} - T_{ref}) + \sum y_i * \lambda_{vap,i} \quad (27)$$

donde la temperatura de referencia se va a tomar como 0°C.

Determinadas las entalpías, se resuelven simultáneamente las ecuaciones 24 y 25 para determinar los flujos molares de las corrientes  $L_1$  y  $V_2$ . Con estos valores, se puede recalculer la composición de la corriente  $V_2$  sin necesidad de recurrir a la suposición de flujos molares constantes utilizada anteriormente:

$$y_2 = \frac{V_1}{V_2} * (y_1 - x_1) + \frac{L_0}{V_2} * (x_1 - x_0) + x_1 \quad (28)$$

Con este nuevo valor de composición, se puede volver a estimar la temperatura de la corriente  $V_2$  mediante un cálculo de temperatura de rocío, para volver a estimar la entalpía y los flujos molares de  $L_1$  y  $V_2$ , iterando hasta la convergencia en composición y temperatura.

Anexo II: Cálculos Justificativos

Se muestra el procedimiento de forma algorítmica en la figura 9, para un plato genérico numerado  $n$ , representado en la figura 8.

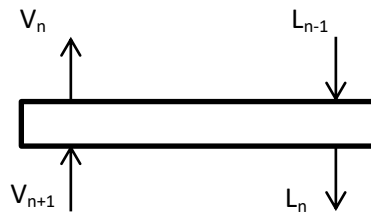


Figura 8 - Plato genérico  $n$  (elaboración propia)

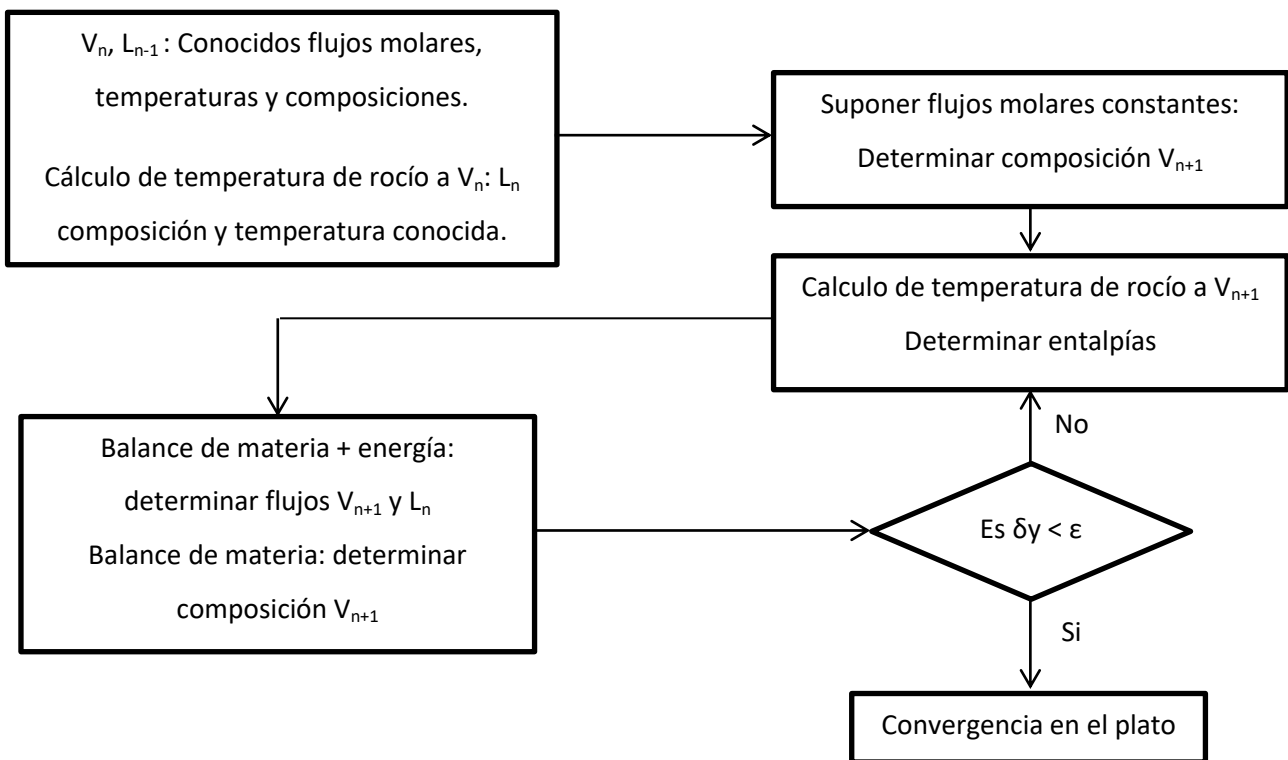


Figura 9 - Algoritmo para iteración en un plato de la sección de rectificación

### 1.4.8. Cálculos etapa a etapa: caldera-alimentación:

Para la caldera y el plato N de la columna se puede plantear un balance similar al planteado para el condensador y el plato 1, figura 10.

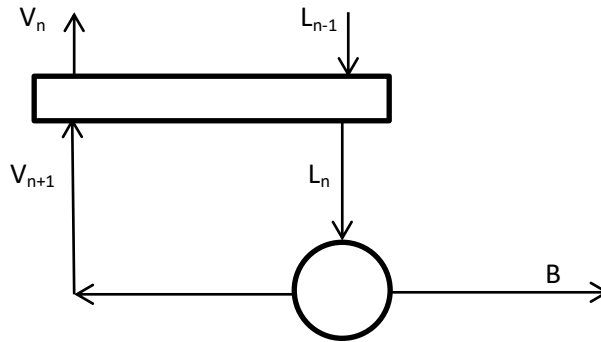


Figura 10 –Flujos al último plato y a la caldera

Conocida la relación de *boilup*, y la corriente de colas B, se pueden calcular los flujos de las corrientes  $V_{n+1}$  y  $L_n$  como:

$$V_{n+1} = \text{boilup} * B \quad (29)$$

$$L_n = B + V_{n+1} \quad (30)$$

Dado que la caldera opera como una etapa de equilibrio, es necesario realizar un cálculo de temperatura de burbuja para determinar la composición de la corriente  $V_{n+1}$ , análogo al detallado en el apartado anterior. Conocida esta composición, se puede realizar un balance de materia a la caldera para determinar la composición de la corriente  $L_n$ :

$$x_n = \frac{B}{L_n} * x_b + \frac{V_{n+1}}{L_n} * y_{n+1} \quad (31)$$

A continuación se realiza otro cálculo de temperatura de burbuja, esta vez a la corriente  $L_n$  para determinar la composición de la corriente  $V_n$  y su temperatura. Conocidas todas las composiciones excepto la de la corriente  $L_{n-1}$ , se asume flujo molar constante para realizar una primera estimación de la misma:

$$x_2 = \frac{V_{n+1}}{L_n} * (y_1 - y_0) + x_1 \quad (32)$$

A partir de la composición calculada se realiza un cálculo de temperatura de burbuja para su temperatura, y se calculan las entalpías de todas las corrientes con las ecuaciones 26 y 27.

Anexo II: Cálculos Justificativos

Con ellas, se pueden utilizar los balances de materia y energía al plato (ecuaciones 24 y 25) para determinar los flujos molares de las corrientes  $V_n$  y  $L_{n-1}$ :

$$V_n = \frac{V_{n+1} * (H_{n+1} - h_{n-1}) + L_1 * (h_{n-1} - h_n)}{(H_n - h_{n-1})} \quad (33)$$

$$L_{n-1} = V_n + L_n - V_{n-1} \quad (34)$$

Determinados los flujos, se puede volver a realizar un balance de materia al plato, abandonando la suposición de flujos molares constantes, para recalcular la composición de la corriente  $L_{n-1}$ :

$$x_n = \frac{L_{n-1}}{V_n} * (y_{n-1} + x_n) + \frac{V_{n-1}}{V_n} * (x_n - y_{n+1}) - y_n \quad (35)$$

Con esta composición, se puede volver a realizar un cálculo de temperatura de burbuja, determinando la temperatura y la entalpía de la corriente para volver a aplicar las ecuaciones 33 y 34, iterando hasta la convergencia.

De forma algorítmica (figura 11), para el plato genérico de la figura 8:

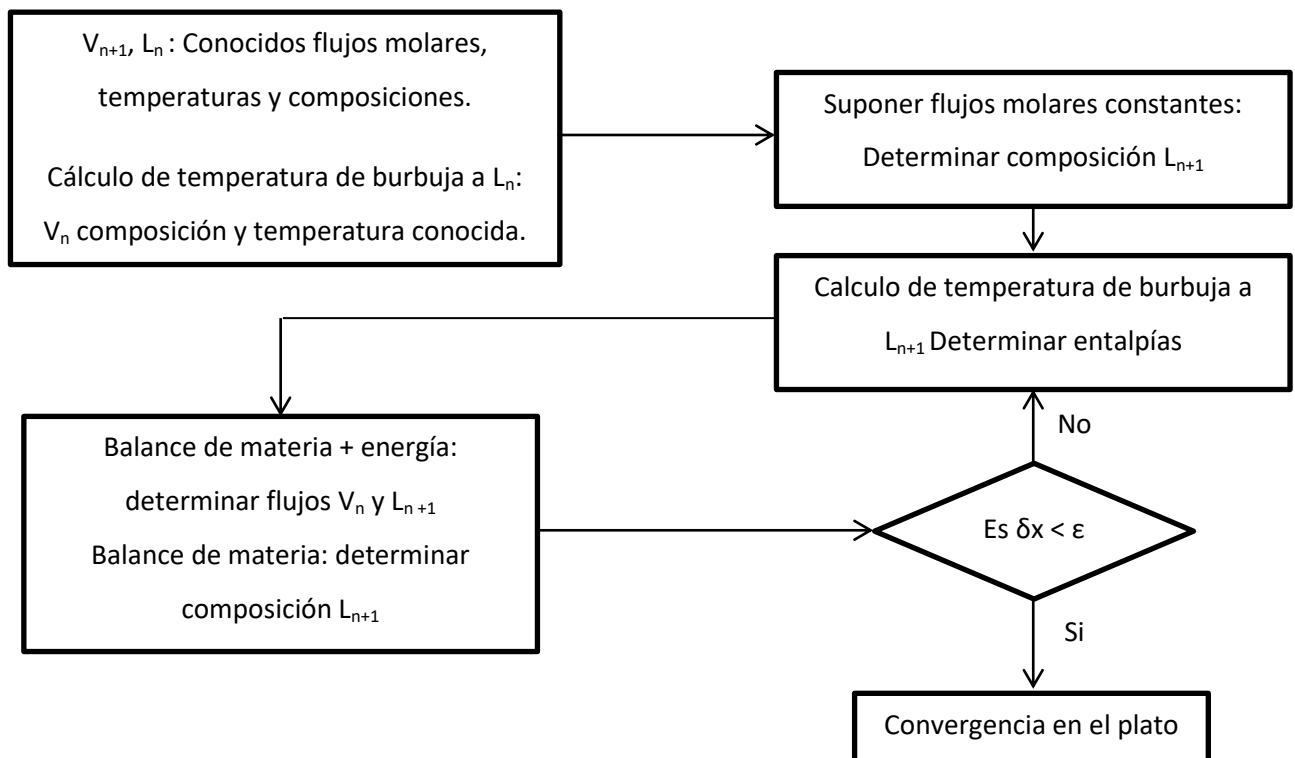


Figura 11 - Algoritmo para iteración en un plato de la sección de agotamiento.

### 1.4.9. Cálculos etapa a etapa: Convergencia de la alimentación

En el procedimiento de cálculo etapa a etapa, se debe alcanzar la convergencia en el plato de alimentación para dar por finalizado el procedimiento de cálculo.

Los cálculos etapa a etapa condensador-alimentación y caldera-alimentación continúan hasta que se alcanza la composición de la alimentación, y en ese punto ambos procedimientos deben coincidir en la predicción de la composición. En el caso de no existir reparto de los componentes clave, el método que comience en el extremo de la columna sin el componente clave siempre predecirá una fracción molar de 0 para el no clave, por lo que las composiciones calculadas en ambas direcciones no coincidirán exactamente. Se recurre por tanto a la relación entre los componentes clave ligero y pesado, denotada como  $LK/HK$ , considerándose la convergencia cuando la relación coincida en ambas direcciones, y coincida además con la de alimentación.

La convergencia en torno a la alimentación es también dependiente de la condición de la alimentación. Según la condición de la alimentación, se evaluará la convergencia en la fase líquida (alimentación líquida, saturada o subenfriada, siempre que no haya vaporización parcial), en la fase vapor (alimentación vapor, saturado o sobrecalentado) o en ambas fases (alimentación como líquido saturado que vaporiza parcialmente).

En la figura 12 se muestra un esquema para la evaluación de la convergencia en torno a la alimentación para una alimentación líquida subenfriada, que como se justificará más adelante será la utilizada en el diseño:

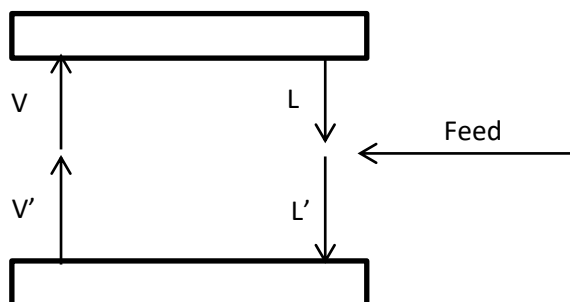


Figura 12 - Esquema del plato de alimentación con un líquido subenfriado

## 1.5. Diseño hidráulico

### 1.5.1. Platos de contacto: tipos y selección

Se puede hacer una clasificación de los platos de contacto en dos categorías amplias: platos de flujo cruzado, donde el líquido avanza sobre la superficie del plato y el vapor lo atraviesa de forma perpendicular, y platos de flujo no cruzado, con diseños especiales.

De forma general, se suelen utilizar platos de flujo cruzado, mientras que los de flujo no cruzado suelen estar reservados a aplicaciones especiales. Dentro de los platos de flujo cruzado se distinguen tres tipos principales, esquematizados en la figura 13:

- Plato perforado: el diseño más sencillo y común. El vapor atraviesa el plato a través de una zona perforada, sobre la que se desplaza el líquido. Son los más económicos, pero permiten un menor rango en la variación de las condiciones de operación al depender del flujo de vapor para evitar goteos. Además, producen la menor caída de presión.
- Platos de campana: en ellos, el vapor asciende por unas secciones tubulares, cubiertas por una campana con perforaciones en los bordes. Esto permite mantener un nivel de líquido constante a todos los caudales de vapor. Es el diseño más caro, y el que genera una mayor caída de presión.
- Platos de válvulas: similares a un plato perforado, pero con agujeros de mayor diámetro cubiertos por tapas móviles que se desplazan en función del caudal de vapor. Tienen un coste intermedio entre los platos perforados y los de campana, permiten un rango de operación similar al de los platos de campana, y producen una caída de presión intermedia entre los otros dos tipos.

Para la mayoría de aplicaciones típicas los platos perforados son adecuados, prefiriéndose los platos de válvulas en el caso de que las condiciones de operación lo exijan.

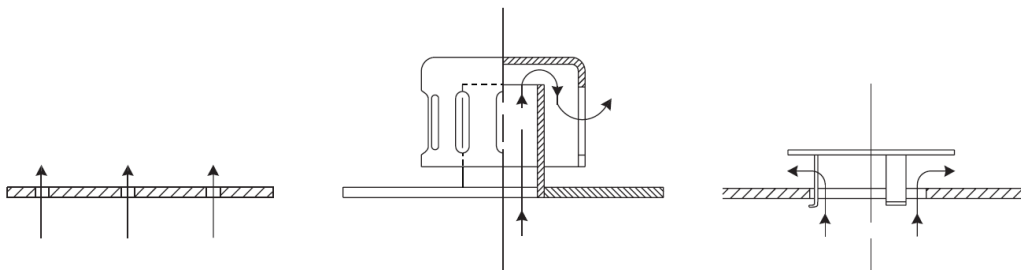


Figura 13- Platos perforado, de campana y de válvula [1]

### 1.5.2. Patrones de flujo: tipos y selección

Dentro de los platos de flujo cruzado se pueden distinguir tres subtipos según el patrón de flujo del líquido:

- Paso simple: el líquido cruza una vez a través del plato de forma transversal. Utilizado para caudales intermedios.
- Paso inverso: El líquido recorre dos veces el plato, de la bajante del plato superior al extremo opuesto, y de ese extremo a la bajante del plato. Se utilizan para casos con flujos de líquido bajos.
- Paso múltiple: El flujo de líquido se divide utilizando varias bajantes, y cada corriente recorre una vez el plato. Se usan para flujos elevados.

### 1.5.3. Procedimiento genérico de diseño:

El procedimiento general se puede esquematizar en los siguientes pasos [1]:

1. Determinar los valores máximos y mínimos de los flujos de líquido y vapor.
2. Estimar las propiedades físicas del sistema.
3. Seleccionar un espaciado entre platos.
4. Estimar el diámetro de la columna
5. Decidir patrón de flujo de líquido.
6. Estimar el reparto de áreas en la columna.
7. Comprobar el goteo.
8. Comprobar la caída de presión.
9. Comprobar la altura de líquido en la bajante.
10. Decidir el *layout* del plato.
11. Recalcular el porcentaje de inundación para el diámetro estimado.
12. Comprobar el arrastre.
13. Optimizar el diseño.

Las áreas mencionadas en el punto 6 se definen, para un plato perforado, como:

- $A_c$ : área total de la columna.
- $A_d$ : área de la bajante.
- $A_n$ : área neta, depende del tipo de patrón de flujo.
- $A_a$ : área activa o de burbujeo, dependiente del patrón de flujo.
- $A_h$ : área total de los agujeros.
- $A_p$ : área perforada.

### 1.5.4. Procedimiento de cálculo

#### 1.5.4.1. Condiciones de inundación

El diseño comienza por determinar la velocidad de inundación, ya que la eficiencia óptima en el plato se alcanza entre el 70 y el 90% de la misma. Se puede estimar por la correlación de Fair:

$$u_f = K_1 * \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v}} \quad (36)$$

dónde -  $u_f$  : velocidad de inundación basada en el área neta, m/s.

- $K_1$ : constante, obtenida de la figura 14:

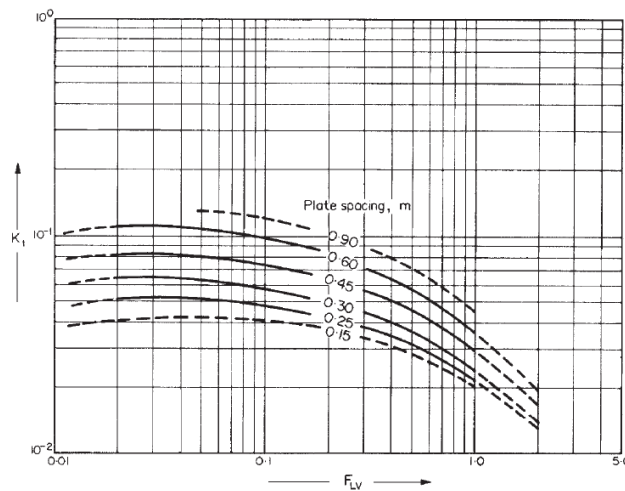


Figura 14 - Velocidad de inundación, platos perforados [1]

Dónde el factor de flujo líquido-vapor,  $F_{lv}$ , se calcula como:

$$F_{lv} = \frac{L_w}{V_w} * \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}} \quad (37)$$

Donde -  $L_w$ ,  $V_w$ : flujo másico de líquido y de vapor, kg/s.

El uso de la figura está restringido a casos en los que se cumplan las siguientes condiciones:

- Tamaño de agujero inferior a 6.5 mm.
- Altura del rebosadero inferior al 15% del espaciado entre platos.
- Sistemas sin formación de espuma.
- Relación entre área perforada y área activa inferior a 0.10; si no es necesario corregir.
- Tensión superficial en el líquido igual a 0.02 N/m, para otros valores corregir  $K_1$  como:

$$K_1' = K_1 * \left[ \frac{\sigma}{0.02} \right]^{0.2} \quad (38)$$

La velocidad de diseño  $\hat{u}_v$  se toma igual a un 80% de la velocidad de inundación:

$$\hat{u}_v = 0.8 * u_f \quad (39)$$

#### 1.5.4.2. Estimación de áreas

La primera estimación del área neta se considera:

$$A_n = \frac{V}{\hat{u}_v} \quad (40)$$

Dónde V es el flujo volumétrico de vapor  $m^3/s$ . Para continuar con el diseño preliminar, y suponiendo flujo de líquido simple, se toma el área neta como un 88% del área total de la columna, considerando el área de la bajante como el 12% restante. El área activa representa el 76% del área de la columna, y el área de los agujeros, un 10% del área activa.

$$A_c = A_n / 0.88 \quad (41)$$

$$A_d = 0.12 * A_c \quad (42)$$

$$A_a = A_c - 2 * A_d = 0.76 * A_c \quad (43)$$

$$A_h = 0.10 * A_a \quad (44)$$

Establecido el diseño provisional del plato, se debe comprobar el goteo. Para ello, se determina la velocidad del vapor en el punto de goteo, que ocurre cuando la pérdida de líquido a través de los agujeros es excesiva.

#### 1.5.4.3. Comprobación de goteo

Para poder calcular el punto de goteo, primero es necesario determinar las condiciones en el rebosadero: altura, altura de cresta de líquido y longitud.

- La altura del rebosadero, denotada como  $h_w$ , es un factor condicionante en la eficiencia del plato, y se debe variar según la presión de operación. Para columnas atmosféricas se recomienda un valor inicial de entre 40 y 50 mm, tomándose generalmente 45 mm.

## Anexo II: Cálculos Justificativos

- La longitud del rebosadero condiciona su área. La suposición del 12% del área de la columna resulta en una longitud de 0,77 veces el diámetro de la misma.  
Si se usa otra relación de áreas, existen figuras para calcular la relación de la longitud con el diámetro.
- La altura de la cresta de líquido que se forma sobre el rebosadero,  $h_{ow}$ , se puede determinar en mm a través de la fórmula:

$$h_{ow} = 750 * \left[ \frac{L_w}{\rho_l * l_w} \right]^{2/3} \quad (45)$$

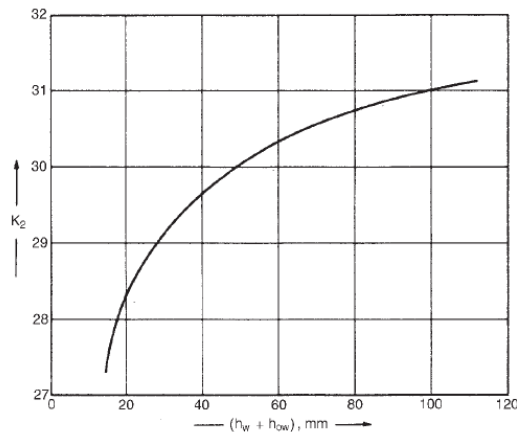
donde  $l_w$  es la longitud del rebosadero en m, y  $L_w$  es análogo a la ecuación 37.

Conocidas estas condiciones, se puede proceder a calcular la velocidad de vapor a través de los agujeros en el punto de goteo, mediante la ecuación:

$$\hat{u}_h = \frac{[K_2 - 0.90 * (25.4 - d_h)]}{(\rho_v)^{1/2}} \quad (46)$$

dónde –  $\hat{u}_h$ : velocidad de vapor en el punto de goteo, m/s.

- $d_h$ : es el diámetro de agujero, mm.
- $K_2$ : constante dependiente de la altura de líquido sobre el plato, obtenida de la fig. 15.



**Figura 15 - Correlación para el punto de goteo [1]**

Esta velocidad debe ser inferior a la velocidad del vapor a través del agujero en las condiciones de diseño, calculada como:

$$u_h = \frac{V}{A_h} \quad (47)$$

#### 1.5.4.4. Caída de presión

A continuación se debe comprobar la caída de presión en el plato, como:

$$h_t = h_d + h_w + h_{ow} + h_r \quad (48)$$

dónde:

- $h_t$ : caída de presión total, mm líquido.
- $h_d$ : caída de presión en el plato seco, mm líquido.
- $h_w, h_{ow}$ : alturas del rebosadero y de la cresta de líquido sobre el mismo, mm líquido.
- $h_r$ : carga residual, mm líquido.

La caída de presión a través del plato seco se estima con una ecuación derivada del modelo de flujo en orificio:

$$h_d = 51 * \left[ \frac{u_h}{C_0} \right]^2 * \frac{\rho_v}{\rho_l} \quad (49)$$

dónde el coeficiente de descarga  $C_0$  es función del espesor del plato, el diámetro de agujero, y la relación entre el área de los agujeros y el área perforada. Su valor se encuentra correlacionado en la figura 16.

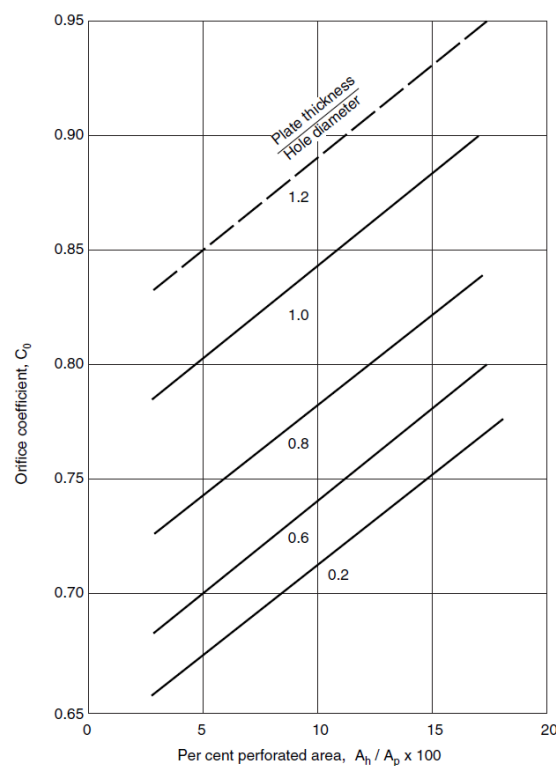


Figura 16 - Correlación para el coeficiente de descarga en platos perforados [1]

La carga residual se puede estimar de forma compleja como una función de parámetros como la tensión superficial del líquido y la densidad y altura de la espuma. Sin embargo, es un término poco significativo, por lo que se puede suponer constante e igual a 12.5 mm de agua, que en términos de mm líquido de la columna:

$$h_r = \frac{12.5 * 10^3}{\rho_l} \quad (50)$$

Así, se puede determinar la caída de presión por plato, que debe ser similar a la supuesta inicialmente, de forma que las propiedades físicas no difieran significativamente de las calculadas.

**1.5.4.5. Altura de líquido sobre la bajante:**

Posteriormente, se comprueba la altura de líquido sobre la bajante. El diseño del plato, la bajante y el espaciado entre platos deben permitir que la altura del líquido y la espuma en la bajante se mantengan siempre dentro de un margen seguro por debajo del rebosadero del plato anterior, para evitar que la columna se inunde. En la figura 17 se muestra un esquema de la situación deseada:

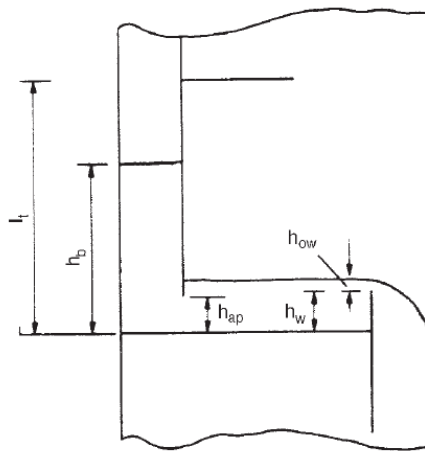


Figura 17 - Diseño de la bajante [1]

dónde  $l_t$  es la separación entre platos,  $h_b$  es la altura de líquido sobre la bajante,  $h_{ap}$  es la altura entre el plato y la bajante del plato anterior y  $h_b$  es la altura de líquido sobre la bajante, que se puede estimar como:

$$h_b = (h_w + h_{ow}) + h_t + h_{dc} \quad (51)$$

## Anexo II: Cálculos Justificativos

dónde  $h_t$  es la caída de presión total a través del plato, calculada anteriormente, y  $h_{dc}$  es la caída de presión en la bajante, que viene determinada fundamentalmente por la resistencia al flujo en el espacio entre la bajante y el plato. Se puede estimar como:

$$h_{dc} = 166 * \left[ \frac{L_{wd}}{\rho_l * A_m} \right]^2 \quad (52)$$

dónde  $L_{wd}$  es el flujo de líquido en la bajante, en kg/s; y  $A_m$  es o bien el área de la bajante  $A_d$  o el área del espacio entre la bajante y el plato  $A_{ap}$  (seleccionando la más pequeña), en  $m^2$ . El área  $A_{ap}$  se puede calcular como:

$$A_{ap} = h_{ap} * l_w \quad (53)$$

dónde  $l_w$  es la longitud del rebosadero, calculada anteriormente.

### 1.5.4.6. Comprobación del arrastre

A continuación se recalcula la velocidad del vapor  $u_v$  para el área neta de la columna:

$$u_v = \frac{V}{A_n} \quad (54)$$

Y se recalcula el porcentaje de inundación con la velocidad de inundación  $u_f$ :

$$\% \text{ inundación} = \frac{u_f - u_v}{u_f} * 100 \quad (55)$$

Y conocido el parámetro de flujo  $F_{lv}$ , se puede estimar el arrastre fraccional  $\psi$  (kg/kg líquido en flujo), mediante la figura 18.

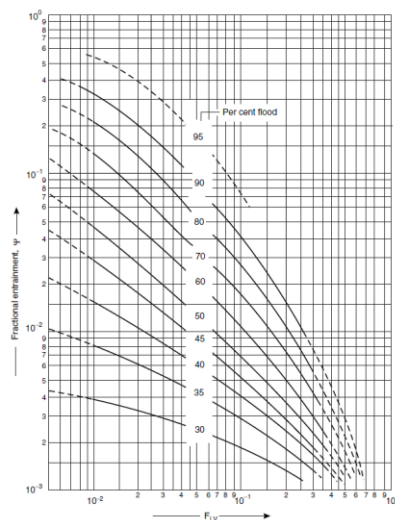
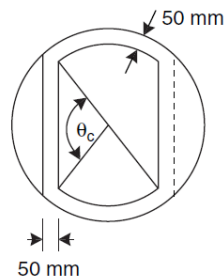


Figura 18 - Correlación para arrastre en platos perforados [1]

Para que el arrastre no afecte significativamente a la eficiencia en el plato, el valor del arrastre fraccional debe ser inferior a 0.1 como regla general, aunque podría ser superior si las condiciones lo exigen.

**1.5.4.7. Geometría del plato: área perforada**

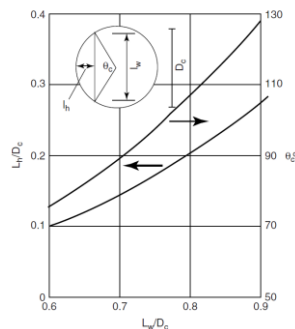
Finalmente, se determinan los parámetros geométricos del plato. La construcción de los platos se puede clasificar en dos tipos según el diámetro de la columna: para diámetros inferiores a aproximadamente 1,2 m, se utilizan platos preconstruidos y unidos en un cartucho que se inserta directamente en la columna, mientras que para diámetros superiores cada plato se construye individualmente mediante secciones sostenidas sobre un entramado de soportes. La estructura típica es la presentada en la figura 19.



**Figura 19 - Plato perforado típico en configuración de cartucho [1]**

El área perforada es la que se muestra en el interior del plato y se puede calcular como la diferencia entre el área activa y el área de la zona no perforada. Esta se compone de los dos bordes superior e inferior, que aportan rigidez al plato, y los bordes derecho e izquierdo, que actúan como zonas de calma para la separación líquido vapor.

El ancho de estos bordes se mueve típicamente entre los 50 y los 75 mm. Su área se puede estimar conocida la relación entre la longitud del rebosadero  $l_w$  y el diámetro de la columna, aplicando la figura 20 para calcular el ángulo  $\theta_c$ .



**Figura 20 - Relación para los parámetros del plato [1]**

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Conocido el ángulo  $\Theta_c$  se puede calcular el ángulo recorrido por los bordes superior e inferior del anillo sin perforar:

$$\theta_b = 360 - 2 * \theta_c \quad (56)$$

Y por tanto el área de estos bordes, con un ancho  $e_{borde}$ , es aproximadamente:

$$A_{bordes} = e_{borde} * (D_c - e_{borde}) * \pi * \frac{\theta_b}{180} \quad (57)$$

El área de las zonas de calma se puede aproximar como:

$$A_{calma} = 2 * [(l_w + D_c) * 50 * 10^{-3}] \quad (58)$$

Y finalmente el área perforada:

$$A_p = A_a - A_{bordes} - A_{calma} \quad (59)$$

Conocida el área de los agujeros del diseño previo, se puede recalculer la relación entre ellas:

$$\frac{A_h}{A_p} \quad (60)$$

que permite calcular la relación entre el pitch y el diámetro de agujero mediante la ecuación:

$$\frac{A_h}{A_p} = 0.9 * \left[ \frac{d_h}{l_p} \right]^2 \quad (61)$$

dónde  $l_p$  es el pitch para una disposición triangular equilátera. La inversa de la relación calculada debe encontrarse entre 2.5 y 4 para que el diseño sea satisfactorio.

Finalmente, se calcula el número de agujeros por plato, conocido el área total de los agujeros y el diámetro de agujero:

$$N_h = \frac{A_h}{\frac{\pi}{4} * d_h^2} \quad (62)$$

## 1.6. Diseño mecánico

### 1.6.1. Consideraciones generales

El diseño de un recipiente a presión viene determinado por una serie de factores generales que se enumeran a continuación:

- Presión de operación: El recipiente debe ser capaz de resistir la presión máxima a la que puede ser expuesto durante la operación, que en el caso de la presión, se suele considerar entre un 5 y un 10% superior a la presión de diseño.
- Temperatura de diseño: El esfuerzo máximo permisible para un material dado varía en función de la temperatura a la que se encuentre, por lo que es un factor clave en el diseño. Generalmente, se considera una temperatura 25°C superior a la de trabajo, para diseñar con un cierto margen de confianza.
- Materiales de construcción: El material elegido debe permitir la construcción sencilla y económica del equipamiento y asegurar la compatibilidad con las condiciones de proceso. Los materiales más comunes de
- Esfuerzo máximo permisible: Se trata del esfuerzo máximo que se considera aceptable a efectos de diseño. Se pueden encontrar tablas generales que muestran el esfuerzo máximo admisible por material y como función de la temperatura, adecuadas para un diseño preliminar.
- Eficiencia de la soldadura: La calidad de una junta soldada depende del tipo, y de la calidad de la operación de soldadura. Esta se puede comprobar tanto por inspección visual, como distintos tipos de inspección radiográfica. A efectos de diseño, se considera un factor de soldadura J, tabulado en función del tipo de soldadura y la inspección realizada. Generalmente varía entre 0.6 y 1.
- Espesor por corrosión: Sobre el espesor requerido por los esfuerzos que se consideren en la etapa de diseño, se añaden entre 2 y 4 mm de espesor extra por corrosión, en función de la severidad de las condiciones esperadas.
- Cargas consideradas en el diseño: Dentro de las cargas fundamentales a considerar en el diseño, se distinguen las siguientes:
  1. Cargas por presión.
  2. Cargas debidas al peso del recipiente y su contenido
  3. Cargas por viento o sísmicas
  4. Cargas soportadas o que reaccionen sobre el recipiente.

- Espesor mínimo de pared: Aunque las cargas consideradas no lo requieran, a efectos de diseño se considera un espesor mínimo de pared en función del diámetro del recipiente, tabulado en la tabla 5.

Tabla 5 - Espesor mínimo requerido para un recipiente cilíndrico

Diámetro del recipiente (m)	Espesor mínimo (mm)
1	5
1-2	7
2-2.5	9
2.5-3	10
3-3.5	12

### 1.6.2. Procedimiento genérico

Para una columna de destilación, el procedimiento general de diseño es el siguiente:

1. Estimar el espesor en la cabeza de la columna, considerando únicamente las cargas por presión.
2. Dividir la longitud total de la columna en secciones de la misma longitud, aumentando progresivamente el espesor al descender en la columna.
3. Calcular todas las cargas que afectan al fondo de la columna de destilación.
4. Realizar un análisis de esfuerzos al fondo de la columna, y comprobar que no se supera el esfuerzo máximo admisible del material a la temperatura de diseño.
5. Optimizar los espesores para minimizar coste, garantizando la operación segura, y aceptar el diseño final.
6. Realizar el diseño del soporte, generalmente de tipo falda.

### 1.6.3. Espesor de carcasa requerido por presión

Como se menciona en el apartado anterior, el diseño comienza por estimar un espesor requerido en la cabeza de la columna, sometida principalmente a esfuerzos por presión interna. El espesor requerido por una carcasa cilíndrica sometida a presión interna se puede calcular, en milímetros, como:

$$e = \frac{P_i * D_i}{2 * J * f - P_i} \quad (63)$$

dónde:  $P_i$  es la presión interna de diseño,  $N/mm^2$ .

- $D_i$ : diámetro interno del recipiente, mm.
- $J$ : es el factor de soldadura

- $f$ : es el esfuerzo máximo admisible a la temperatura de diseño,  $N/mm^2$ .

En el caso de que el espesor resultante sea inferior al mínimo requerido para el diámetro de la columna, se considerará el segundo. Además se debe añadir el espesor por corrosión.

El resto de la columna se divide en varias secciones de igual longitud, y se aumenta progresivamente el espesor al bajar en la columna, unos 2 mm por sección, aunque es dependiente de la altura de la columna y por tanto el número de secciones.

#### 1.6.4. Diseño de los cabezales

Los tres tipos más usados de cabezales son: toriesférico, elipsoidal y hemisférico. Dado que la presión de trabajo es cercana a la atmosférica nos centraremos en el diseño de un cabezal toriesférico, cuya sección se presenta en la figura 21.

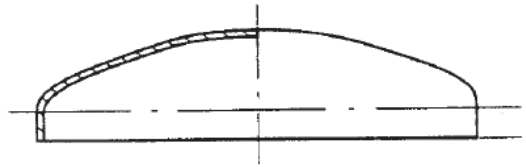


Figura 21 - Sección de un cabezal toriesférico [1]

Este tipo de diseño proporciona la opción más económica para presiones inferiores a los 10 bares, y puede ser competitivo frente a los cabezales elipsoidales a presiones moderadamente superiores. El espesor requerido se puede estimar como:

$$e = \frac{P_i * D_i}{2 * f * J + P_i * (C_s - 0,2)} \quad (64)$$

Dónde los términos  $P_i$ ,  $D_i$ ,  $f$  y  $J$  son análogos a los de la ecuación 63, y el término  $C_s$  es un factor de estrés, calculado como:

$$C_s = \frac{1}{4} * (3 + \sqrt{R_c/R_k}) \quad (65)$$

Dónde  $R_c$  es radio de la corona, que debe ser ligeramente inferior al diámetro de la columna, y  $R_k$  es el radio del codo, calculado a través de la expresión:

$$\frac{R_k}{R_c} < 0,06 \quad (66)$$

### 1.6.5. Análisis de esfuerzos en el fondo de la columna

Como se ha indicado, en el fondo de la columna no basta, como en cabezas, con considerar únicamente los esfuerzos generados por la presión interna. Son significativos a efectos de diseño:

Los esfuerzos longitudinales y circunferenciales debidos a la presión interna, calculados como:

$$\sigma_h = \frac{P * D_i}{2 * t} \quad (67)$$

$$\sigma_L = \frac{P * D_i}{4 * t} \quad (68)$$

dónde  $\sigma_h$  es el esfuerzo circunferencial, N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_L$  el esfuerzo longitudinal, N/mm<sup>2</sup>, t es el espesor de la pared en mm, y el resto de términos son análogos a las ecuaciones anteriores.

El esfuerzo debido al peso del recipiente, su contenido, y cualquier accesorio,  $\sigma_w$ , calculado como:

$$\sigma_w = \frac{W}{\pi * (D_i + t) * t} \quad (69)$$

dónde W es el peso total soportado por el recipiente en el plano estudiado, en N. Se corresponde con la suma de las principales cargas de peso: la carcasa del recipiente, aproximada como:

$$W_v = 240 * C_v * D_m * (H_v + 0,8 * D_m) * t \quad (70)$$

dónde  $W_v$  es el peso total de la carcasa, en N:

- $C_v$ : factor de corrección para equipamiento auxiliar, 1,15 para columnas de destilación.
- $H_v$ : longitud de la sección cilíndrica, m.
- $D_m$ : diámetro medio del recipiente, calculado como el diámetro interno más la media de los espesores en las secciones, m

el peso de los platos, estimado como:

$$W_{plato} = 1.2 * A_{plato} \quad (71)$$

dónde  $W_{plato}$  es el peso en kN y  $A_{plato}$  es la sección transversal de la columna, m<sup>2</sup>.

Y por último el peso del relleno aislante,  $W_{aislante}$ , para el cual se debe asumir un espesor  $t_{aislante}$ , y una densidad, tabulada según el tipo de material en la tabla 6.

Tabla 6 - Densidades de materiales aislantes [1]

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Vidrio celular	150
Lana mineral	130
Fibra de vidrio	100
Silicato de calcio	200

Se estima mediante la ecuación 72, y se dobla el valor obtenido:

$$W_{aislante} = g * \rho_{aislante} * \pi/4 * [(D_m + t_{aislante})^2 - D_m^2] * H_{columna} \quad (72)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

- H<sub>columna</sub>: altura de la columna, m.
- D<sub>m</sub>: es el diámetro medio de la columna, m.
- t<sub>aislante</sub>: espesor de la capa de aislante, m.

El esfuerzo debido al peso puede ser compresivo o de tracción, según nos encontremos por encima o por debajo del plano del soporte del recipiente. En el caso de la columna de destilación el soporte de falda se encuentra en la parte más baja, por lo que siempre será compresivo (signo negativo).

Finalmente, el esfuerzo de flexión resultante de los esfuerzos flectores a los que está sometida la columna, fundamentalmente los derivados de la carga de viento y los causados por equipamiento montado lateralmente a la columna. El esfuerzo se calcula como:

$$\sigma_b = \pm \frac{M_v}{I_v} * \left( \frac{D_i}{2} + t \right) \quad (73)$$

Dónde M<sub>v</sub> es el momento flector total aplicado en el plano considerado, en N.m, e I<sub>v</sub> el segundo momento de área, calculado como:

$$I_v = \frac{\pi}{64} * (D_0^4 - D_i^4) \quad (74)$$

dónde D<sub>0</sub> y D<sub>i</sub> son respectivamente el diámetro externo e interno de la columna, en milímetros.

Para calcular el momento flector debido a la carga de viento, se puede asumir de forma preliminar una presión dinámica del viento de 1280 N/m<sup>2</sup>, que actúa sobre el diámetro medio del exterior de la columna, incluyendo el aislamiento. Para determinarlo, se calcula la media del espesor de la pared del recipiente entre todas las secciones, y se suma junto con el espesor del aislamiento al diámetro de la columna:

Anexo II: Cálculos Justificativos

$$D_{eff} = 2 * \left( \frac{\sum t_{pared}}{n_{secciones}} + t_{aislamiento} \right) + D_c \quad (75)$$

Con lo que se puede calcular la carga por metro lineal, en N/m, como:

$$F_w = 1280 * D_{eff} \quad (76)$$

Dado que una columna de destilación en un soporte de falda se comporta como una viga en voladizo, el momento de flexión se puede calcular en cualquier plano como:

$$M_x = \frac{F_w * x^2}{2} \quad (77)$$

dónde x es la distancia medida del extremo libre de la columna al plano estudiado.

Una vez calculados todos los esfuerzos significativos, se pueden calcular los esfuerzos circunferenciales y longitudinales resultantes. En el caso del esfuerzo circunferencial, únicamente se considera el derivado de la presión interna del recipiente, mientras que el esfuerzo longitudinal total se calcula como:

$$\sigma_z = \sigma_L + \sigma_w \pm \sigma_b \quad (78)$$

donde  $\sigma_w$  tiene valor negativo, al tratarse de un esfuerzo compresivo, y  $\sigma_b$  puede ser positivo o negativo según la zona de la columna en la que nos encontremos: a favor del viento se trata de un esfuerzo de tracción (positivo), y en contra, de un esfuerzo compresivo (negativo).

Los esfuerzos principales se denotan como  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , siendo el tercero el correspondiente a la dirección radial, despreciable en recipientes de paredes delgadas. Los dos primeros se calculan como:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} * \left[ \sigma_h + \sigma_z + \sqrt{(\sigma_h - \sigma_z)^2 + 4 * \tau^2} \right] \quad (79)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} * \left[ \sigma_h + \sigma_z - \sqrt{(\sigma_h - \sigma_z)^2 + 4 * \tau^2} \right] \quad (80)$$

dónde  $\tau$  es el esfuerzo de torsión, despreciable en un diseño preliminar. Por tanto, los esfuerzos principales se pueden simplificar como:

$$\sigma_1 = \sigma_z \quad (81)$$

$$\sigma_2 = \sigma_h \quad (82)$$

Los esfuerzos principales se representan sobre el plano en el que actúan en la figura 22.

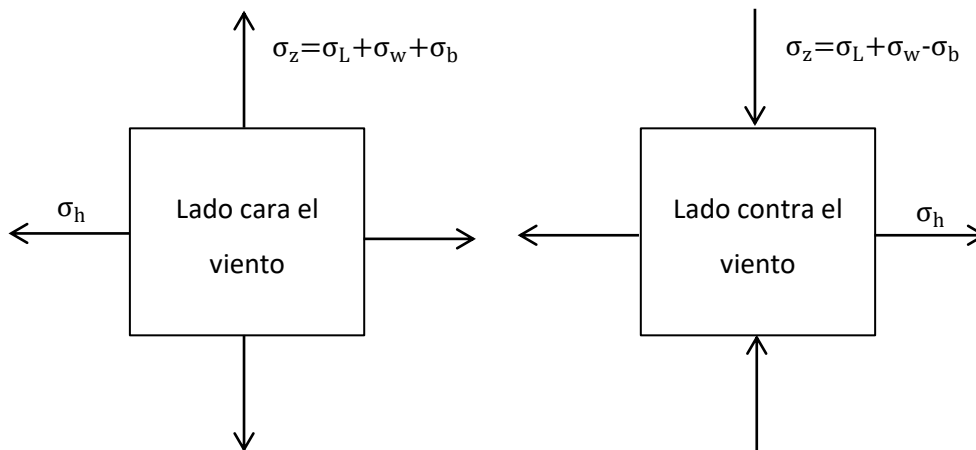


Figura 22 - Momentos totales sobre el plano (elaboración propia)

Se debe calcular la máxima diferencia entre los esfuerzos, que en este caso se corresponde al lado en contra del viento, ya que el esfuerzo longitudinal es compresivo y tiene signo negativo, por lo que es el esfuerzo total será máximo:

$$\sigma_{max} = \sigma_h - \sigma_z \quad (83)$$

El diseño será mecánicamente válido siempre que el esfuerzo máximo admisible del material sea superior, con un cierto margen de seguridad, al esfuerzo máximo calculado.

En la zona donde el esfuerzo longitudinal es compresivo, el recipiente puede fallar mecánicamente debido a inestabilidades elástica, fenómeno conocido como pandeo. Este tipo de fallo puede afectar al recipiente completo, o a zonas de forma local. Dado que la zona en contra del viento de la columna está sometida a esfuerzos longitudinales compresivos, es necesario comprobar que no se supere el esfuerzo crítico, calculado como:

$$\sigma_c = 2 \times 10^4 * \left( \frac{t}{D_0} \right) \quad (84)$$

Ecuación válida para aceros con un módulo de Young de 200000 N/mm<sup>2</sup> a temperatura ambiente, y que incorpora un factor de seguridad de 12.

### 1.6.6. Diseño del soporte de la columna

Los soportes más utilizados para columnas de destilación son tipo falda, consistentes en una carcasa cónica o cilíndrica alrededor de la base de la columna que transmite la carga a los cimientos, como se observa en la figura 23:

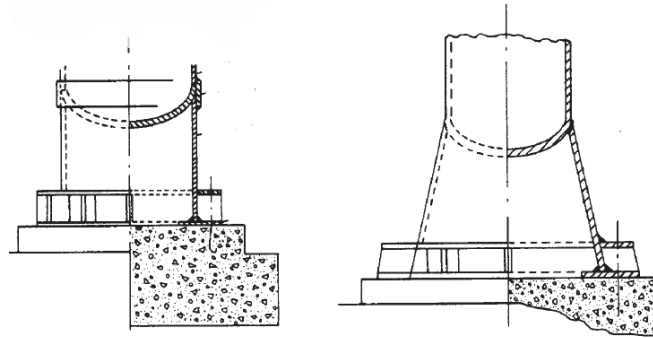


Figura 23 - Soportes de falda: cilíndrico y cónico [1]

Las formas de instalación más común son o bien soldadas al cabezal inferior de la columna, o soldada a ras de la carcasa, que se muestran en la figura 24:

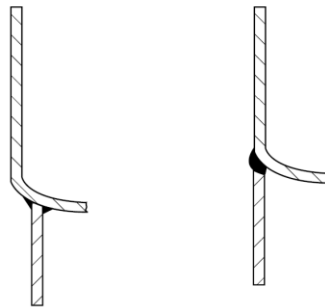


Figura 24 - Tipos de soldadura en el soporte de falda [1]

El diseño de la falda debe permitirle soportar las cargas impuestas por el peso total de la columna y los momentos flectores causados por la misma, pero no va a estar sometida a la presión interna del recipiente. Los esfuerzos resultantes son:

$$\sigma_s \text{ (tensión)} = \sigma_{bs} - \sigma_{ws} \quad (85)$$

y

$$\sigma_s \text{ (compresión)} = \sigma_{bs} + \sigma_{ws} \quad (86)$$

## Anexo II: Cálculos Justificativos

donde  $\sigma_{bs}$  es el esfuerzo flector en la falda:

$$\sigma_{bs} = \frac{4 * M_s}{\pi * (D_s + t_s) * t_s * D_s} \quad (87)$$

Donde  $M_s$  es el momento flector máximo en la base de la falda, análogo al calculado en la base de la columna mediante la ecuación 77, y:

- $D_s$ : diámetro interno de la falda en la base, m.
- $t_s$ : espesor de la falda, mm.

y  $\sigma_{ws}$  es el esfuerzo debido al peso:

$$\sigma_{ws} = \frac{W}{\pi * (D_s + t_s) * t_s} \quad (88)$$

dónde  $W$  es el peso total de la columna, análogo al calculado en el apartado anterior, más el peso del recipiente lleno de agua, para garantizar seguridad durante las pruebas hidráulicas.

El espesor de la falda tiene que ser tal que, para el peor caso de peso y momento flector se cumplan los siguientes criterios:

$$\sigma_s \text{ (tensión)} < f_s * J * \sin \theta_s \quad (89)$$

$$\sigma_s \text{ (compresión)} < 0.125 * E * \left(\frac{t_s}{D_s}\right) * \sin \theta_s \quad (90)$$

Dónde  $f_s$  es el esfuerzo máximo permisible para el material de la carcasa, a temperatura ambiente

- $J$ : factor de soldadura.
- $\theta_s$ : ángulo de la falda, generalmente entre  $80^\circ$  y  $90^\circ$ .

El espesor de la base debe ser de al menos 6 mm, y debe añadirse el espesor por corrosión.

## 1.7. Columna de destilación T-102:

### 1.7.1. Datos de entalpía:

Para el cálculo de las entalpías molares de las corrientes de líquido y vapor a través de las ecuaciones 26 y 27, es necesario disponer de valores adecuados de calores específicos en la fase líquida, y entalpías de ebullición. Los datos de calores específicos se han calculado como los valores medios entre los 25 °C y los 90 °C para el agua y el butan-2-ol, tomando 4 valores intermedios, y en el caso de la butan-2-ona, como el valor medio entre los 25 °C y los 70 °C (dado que vaporiza a 76 °C), tomando dos valores intermedios. Se han tomado del software *Aspen Hysys*, y se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 - Valores de calor específico

T (°C)	Cp <sub>Agua</sub> (kJ/kmol °C)	Cp <sub>SBA</sub> (kJ/kmol °C)	Cp <sub>MEK</sub> (kJ/kmol °C)
25	75,7	203,6	153,7
40	76,16	208,2	157,5
50	76,04	211,4	160,1
70	75,66	218,1	165,4
80	75,55	221,7	-
90	75,52	225,4	-

Los valores medios se presentan en la tabla 8.

Tabla 8 - Valores medios de calor específico

Compuesto	Cp <sub>Medio</sub> (kJ/kmol °C)
Agua	75,77
SBA	214,73
MEK	159,18

Como se puede observar en la tabla 7, al tratarse de compuestos en fase líquida, la variación del calor específico no es muy significativa, y apenas se comete error al trabajar con los valores medios.

Los valores de entalpía de ebullición,  $\lambda_{vap}$ , se han tomado de la referencia [1], a las temperaturas de ebullición normales a la presión de 101,325 kPa. Se muestran en la tabla 9.

Tabla 9 - Entalpías de vaporización a 101,3 kPa

Compuesto	$\lambda_{vap}$ (kJ/kmol)
Agua	46784,89
SBA	58113,48
MEK	44052,36

### 1.7.2. Especificaciones de la corriente de alimentación

La alimentación a la columna de destilación T-102 es un líquido subenfriado, procedente del separador de fases. La alimentación tiene la composición indicada en la tabla 10.

Tabla 10- Alimentación a la columna T-102

Compuesto	Fi (kmol/h)	xi	Fm,i (kg/h)
Agua	0,0381	0,0010	0,6868
SBA	3,8746	0,0969	2601,0362
MEK	36,0719	0,9021	287,1977

Las principales propiedades de la corriente se indican en la tabla 11.

Tabla 11 - Propiedades de la corriente de alimentación

Temperatura (°C)	25,0
Presión (kPa)	101,325
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	822,6
$\mu$ (Pa.s)	0,494 x10 <sup>-3</sup>
$h_L$ (kJ/kmol)	4112,0

Dónde la entalpía molar se ha calculado a través de la ecuación 26, utilizando los valores presentados en la sección anterior. El resto de propiedades físicas se han obtenido del simulador comercial *Aspen Hysys*.

Como será de utilidad en cálculos posteriores, se realiza un cálculo de temperatura de burbuja análogo al planteado en el apartado 1.3. Se obtiene una temperatura de burbuja de 80,53°C y las volatilidades relativas con respecto al compuesto clave pesado (butan-2-ol) indicadas en la tabla 12.

Tabla 12 - Constantes de equilibrio y volatilidades relativas en la alimentación

	Ki	$\alpha$
Agua	3,659	5,646
SBA	0,648	1
MEK	1,035	1,597

### 1.7.3. Especificación de las corrientes de producto: Geddes-Hengstebeck

Los dos compuestos clave en la separación son la butan-2-ona (clave ligero) y el butan-2-ol (clave pesado). El compuesto no clave, el agua, está presente en una concentración baja, y como se ha indicado anteriormente forma un azeótropo mínimo con el agua.

Por lo tanto, se va a partir de la suposición de que no hay reparto del agua, y que la totalidad de la misma sale de la columna en la corriente de destilado, con lo que la corriente de colas es binaria. Esto permite, una vez determinado el grado de separación requerido para los compuestos clave, realizar un balance de materia para determinar la composición de las corrientes de producto.

El grado de pureza requerido para la butan-2-ona es de un 99,7% en la corriente de cabezas, y la recirculación de butan-2-ol puro reduce el tamaño requerido en el reactor, pero dificulta la separación. Se parte de una fracción molar de butan-2-ol en la corriente de colas del 99%, que se reducirá si el número de platos requeridos en la columna es excesivo. Se espera que esto no ocurra, ya que la volatilidad relativa entre butan-2-ol y butan-2-ona es lo suficientemente alta para permitir una buena separación.

Realizado el balance de materia, se obtienen las composiciones y flujos molares en destilado (denotados como  $d_i$ ) y en el producto de colas ( $b_i$ ) indicadas en la tabla 13.

Tabla 13 - Corrientes de destilado y colas

Compuesto	$d_i$	$x_{i,d}$	$x_{i,b}$	$b_i$
Agua	0,0381	0,0011	0,0000	0,0000
SBA	0,0703	0,0019	0,9900	3,8043
MEK	36,0335	0,9970	0,0100	0,0384

Con estos valores, se puede proceder a aplicar el método de Geddes-Hengstebeck para comprobar la suposición acerca del reparto del agua. Para ello se representa en la figura 25 el logaritmo de  $d_i/b_i$  frente al logaritmo de la volatilidad relativa, presentados en la tabla 14, para los dos componentes claves:

Tabla 14 - Parámetros de Geddes-Hengstebeck

Compuesto	$d_i/b_i$	$\log(d_i/b_i)$	$\log(\alpha_i)$
SBA	0,0185	-1,73	0,00
MEK	938,3724	2,97	0,20

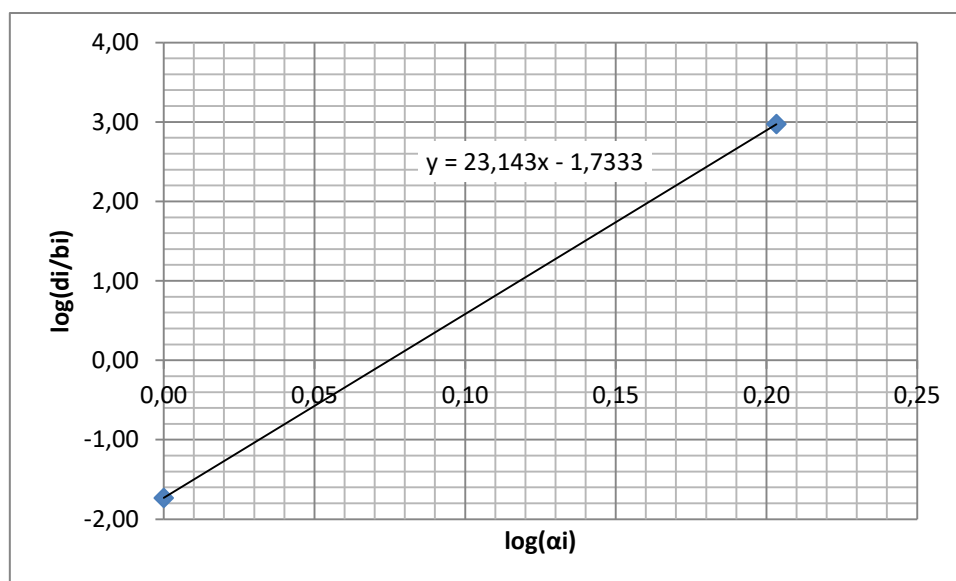


Figura 25 - Representación gráfica de la ecuación de Geddes-Hengstebeck

Al linealizar, se obtienen los parámetros A y C de la ecuación 12, indicados en la tabla 15.

Tabla 15 - Parámetros A y C

A	C
-1,733	23,143

Conocida la volatilidad relativa del agua, se aplica la ecuación 12 con los parámetros obtenidos, y se obtiene la relación de flujos  $d_i/b_i$ . El valor, como se esperaba, es prácticamente infinito, y por lo tanto se cumple la suposición de que no existe reparto de agua entre corrientes de producto.

En este punto, se pueden recalcular las volatilidades relativas, para la corriente de cabezas (en su punto de rocío), y de colas (en su punto de burbuja). Los cálculos se realizan de forma análoga a los presentados en los apartados anteriores, obteniendo los valores de la tabla 16.

Tabla 16 - Valores de volatilidad relativa en colas y cabezas

Colas $T_{\text{burbuja}}: 99,09^\circ\text{C}$			Cabezas $T_{\text{rocío}}: 79,6^\circ\text{C}$		
Compuesto	K	$\alpha$	Compuesto	K	$\alpha$
Agua	3,833	3,891	Agua	3,937	5,784
SBA	0,985	1	SBA	0,681	1
MEK	2,486	2,523	MEK	1,000	1,469

En la tabla 17 se indican los valores de la volatilidad relativa media en la columna, obtenidos como la media geométrica entre el valor de colas y el de cabezas.

Tabla 17 - Volatilidades relativas medias

Compuesto	$\alpha_{media}$
Agua	4,744
SBA	1,000
MEK	1,926

Con estas volatilidades se puede repetir el procedimiento anterior, y volver a representar y calcular nuevos valores para las constantes A y C, figura 26.

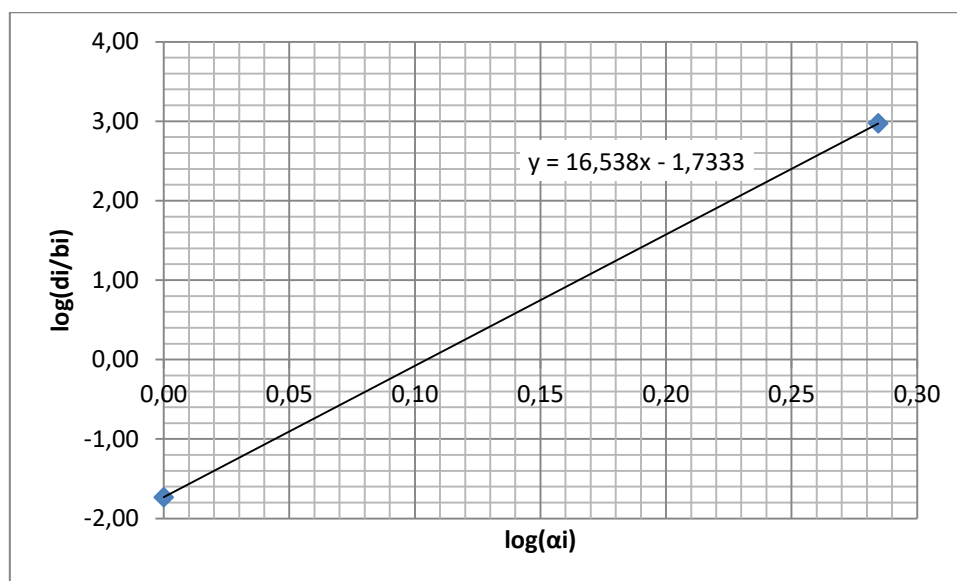


Figura 26 - Representación gráfica de Geddes-Hengstebeck para las volatilidades medias

Los valores de A y C obtenidos se presentan en la tabla 18.

Tabla 18 - Parámetros A y C

A	C
-1,733	16,538

Se vuelve a recalcular el valor de  $d_i/b_i$  para el agua, obteniendo el mismo resultado de no reparto entre corrientes. Esta segunda etapa de cálculo no es estrictamente necesaria al confirmarse la suposición en la primera iteración. Sin embargo el cálculo es sencillo, y la determinación de las volatilidades relativas en cabezas y colas será necesaria posteriormente.

### 1.7.4. Número mínimo de etapas

Conocida la volatilidad relativa media de los compuestos en toda la columna, y las composiciones de la corriente de colas y de cabezas, se puede aplicar la ecuación 14 (Fenske) para obtener una aproximación del número mínimo de etapas, tabla 19.

Tabla 19 - Número mínimo de etapas (reflujo total)

<b>N mínimo</b>	16,54
-----------------	-------

### 1.7.5. Reflujo mínimo

Para determinar el reflujo mínimo se utiliza la ecuación 15, que necesita el parámetro  $\Theta$  determinado mediante la ecuación 16. Para aplicar la ecuación 16, es necesario calcular la calidad de la alimentación  $q$ , que se define como:

$$q = \frac{\text{entalpía para vaporizar 1 mol de alimentación}}{\text{entalpía molar latente de la alimentación}} \quad (91)$$

que se calcula como:

$$q = \frac{\sum z_i * \lambda_{vap,i}}{\sum z_i * C_{pmedio,i} * (T_{burbuja} - T_{alim}) + \lambda_{vap,i}} \quad (92)$$

se obtiene el valor indicado en la tabla 20.

Tabla 20 - Calidad de la alimentación

<b>q</b>	1,28
----------	------

Con el que se puede aplicar la ecuación 15 para calcular el valor del reflujo mínimo, tabla 21.

Tabla 21 - Reflujo mínimo

<b>R<sub>min</sub></b>	1,13
------------------------	------

### 1.7.6. Localización de la alimentación

Aplicando la ecuación de 17 (Kirkibride), se calcula la relación  $N_r/N_s$  que indica la posición relativa de la alimentación. El resultado se presenta en la tabla 22.

Tabla 22 - Posición relativa de la alimentación

<b><math>N_r/N_s</math></b>	0,784
-----------------------------	-------

### 1.7.7. Correlación de Erbar-Maddox

Conocidos el reflujo mínimo y el número de etapas, se puede utilizar la correlación de Erbar-Maddox para estimar el número de etapas de equilibrio para una relación de reflujo dada. La relación de reflujo se elige, como ya se ha mencionado, entre 1,3 y 1,5 veces el reflujo mínimo. En este caso, se va a partir de una relación de reflujo de 1,8; que aplicando la figura 6, proporciona una relación entre el número mínimo de etapas y el número real de 0,65:

Tabla 23 - Relación entre el número real y el mínimo de etapas para el reflujo seleccionado

R	$N_m/N$
1,8	0,65

Con lo que el número de etapas resultante es de 25,4; redondeado a 26.

### 1.7.8. Simulación preliminar

Previo al diseño riguroso etapa a etapa, se va a realizar una simulación preliminar en *Aspen Hysys*, que proporcione una idea de los perfiles de temperatura, composición y flujo que se van a encontrar en la columna. La simulación se inicia mediante la unidad de columna *shortcut*, presentada en la figura 27, que únicamente requiere las especificaciones de separación de los compuestos clave, y la presión en condensador y caldera; que se toma igual a la de alimentación. Se va a utilizar Wilson como paquete termodinámico.

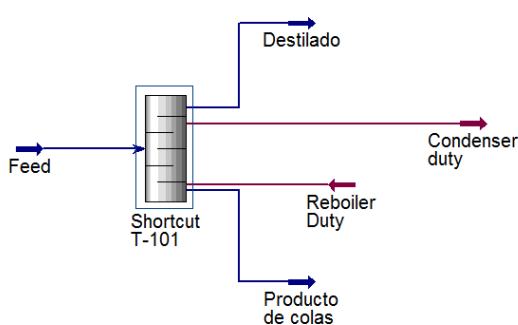


Figura 27 - Shortcut de la columna T-102 (*Aspen Hysys*)

Los valores de especificación que se han utilizado se presentan en la tabla 24. permiten obtener las composiciones deseadas, indicadas en la tabla 13.

Tabla 24 - Especificaciones de separación al shortcut

LK en colas (butan-2-ona)	HK en cabezas (butan-2-ol)
0,01	0,0019

Con lo que se obtienen los resultados presentados en la tabla 25.

**Tabla 25 - Resultados de reflujo y etapas mínimos para el shortcut**

$R_{min}$	$N_{min}$
1,04	15,4

Se puede observar que el *shortcut* proporciona unos resultados muy similares a los obtenidos mediante las ecuaciones de Fenske y Underwood, pero que el modelo termodinámico utilizado para el cálculo manual está prediciendo una separación ligeramente inferior entre componentes; por lo que indica unos requerimientos de reflujo mínimo y número de etapas mínimo algo superior.

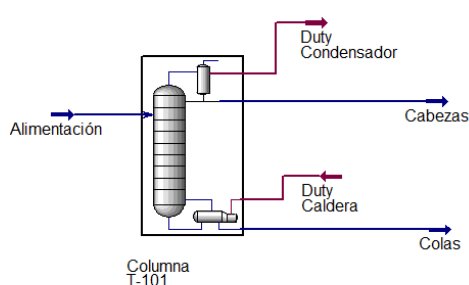
Seleccionando en el *shortcut* el reflujo previamente supuesto con la correlación de Erbar-Maddox, 1,8; se obtienen los resultados adicionales del *shortcutm* presentados en la tabla 26.

**Tabla 26 - Resultados del shortcut para reflujo 1,8**

N etapas	Posición Alimentación
26,4	11,6

que se corresponde bastante bien con el valor obtenido mediante la correlación, 26 etapas.

Partiendo de los datos del *shortcut* se puede realizar la simulación de la unidad completa, presentada en la figura 28.



**Figura 28 - Columna de destilación T-102 (Aspen Hysys)**

La simulación se ha realizado suponiendo que la caída de presión a lo largo de la columna no va a ser significativa para las propiedades físicas y termodinámicas del sistema, lo cual en una columna de altura moderada es una suposición aceptable. La presión de operación es por tanto igual a la de alimentación, atmosférica.

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Al tratarse de una columna con condensador total, se van a utilizar como especificaciones el número de etapas, la posición de alimentación, y las composiciones de butan-2-ol en colas y butan-2-ona en cabezas. Se resumen en la tabla 27.

Tabla 27 - Especificaciones para la simulación de la columna

<b>N etapas</b>	30
<b>Plato alimentación</b>	19
<b>butan-2-ona en cabezas</b>	0,9970
<b>butan-2-ol en colas</b>	0,9900

Estas especificaciones se han obtenido por ensayo y error, exceptuando las de composición que responde a las necesidades de producción. El número de etapas se obtiene como aquel que permite trabar en el entorno del reflujo óptimo, cercano al valor de 1,8 seleccionado inicialmente. La posición de la alimentación óptima es la que proporciona el valor mínimo de reflujo para el número de etapas dado. El valor del reflujo obtenido se presenta en la tabla 28.

Tabla 28 - Reflujo obtenido para las especificaciones

<b>Reflujo</b>	1,79
----------------	------

Con estas especificaciones, se obtienen los siguientes perfiles en la columna:

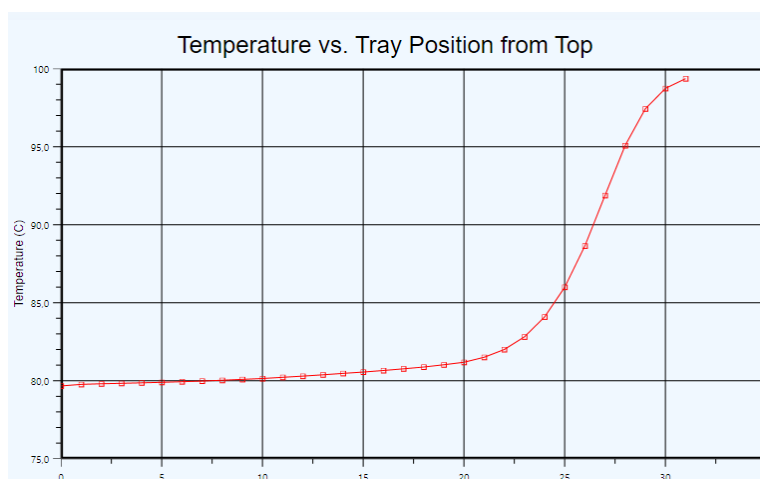
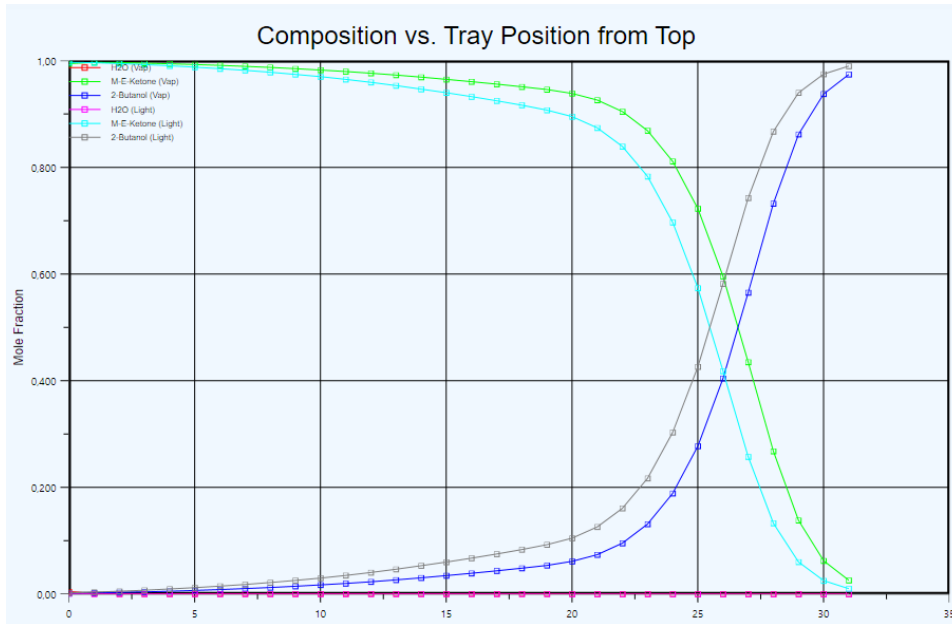


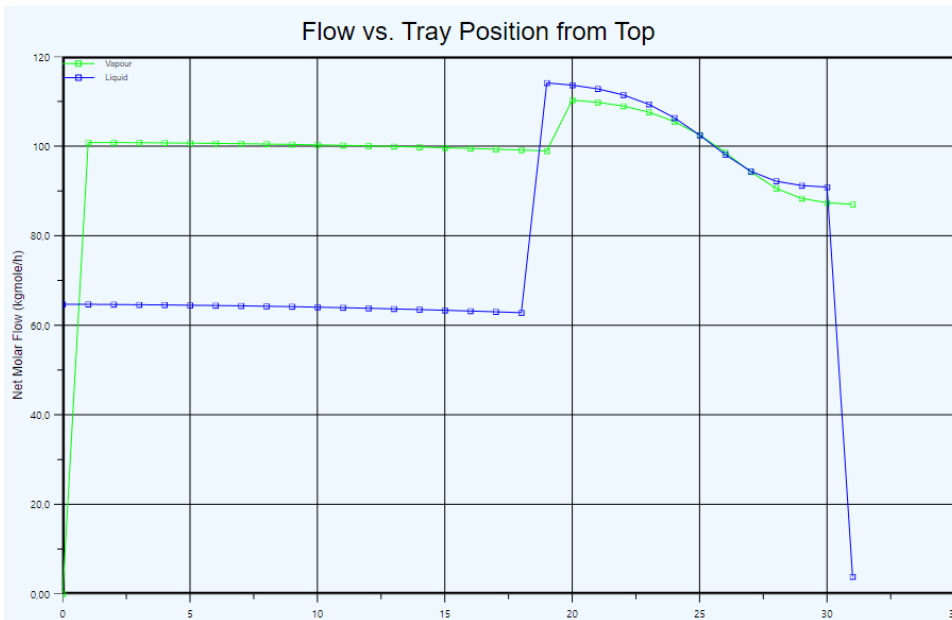
Figura 29 - Perfil de temperatura (*Aspen Hysys*)

En el perfil de temperaturas obtenido, figura 29, se observa como el cambio de temperatura en la sección de rectificación es pequeño, ya que los cambios de composición entre etapas son igualmente pequeños, al encontrarnos en el extremo derecho del diagrama x-y. Por la contra, en la sección de agotamiento el cambio de composición es mucho más grande entre etapas y por tanto también el de temperatura. El perfil de composición se muestra en la figura 30.



**Figura 30 - Perfil de composiciones en el líquido y el vapor (Aspen Hysys)**

El perfil de flujos molares, figura 31, muestra una situación análoga a la de las figuras 29 y 30. En la sección de rectificación la diferencia entre entalpías de platos consecutivos es pequeña, con lo que los flujos permanecen prácticamente constantes. Por el contrario, en la sección de agotamiento, el cambio de composición entre platos es grande, lo que se traduce en una mayor diferencia entre entalpías, y por tanto una mayor variación del flujo:



**Figura 31 - Perfil de flujos molares (Aspen Hysys)**

### 1.7.9. Cálculos etapa a etapa

Se van a presentar los resultados finales de los cálculos etapa a etapa. Cabe destacar que se realizó un cálculo preliminar con el reflujo seleccionado de 1,8, pero dado que la predicción de volatilidad relativa del modelo termodinámico usado para los cálculos etapa a etapa es ligeramente inferior a la que predice el paquete de Wilson utilizado por *Hysys*, se obtenía un número de platos requerido muy elevado. Esto ocurre debido a la alta pureza requerida en el producto de cabezas, ya que al trabajar en diferencias de composición pequeñas entre platos la diferencia en la predicción del equilibrio se ve magnificada aunque sea pequeña. En la figura 32 se muestra la comparativa entre la predicción de *Hysys* y la del modelo utilizado a mano para el sistema binario butan-2-ona/butan-2-ol.

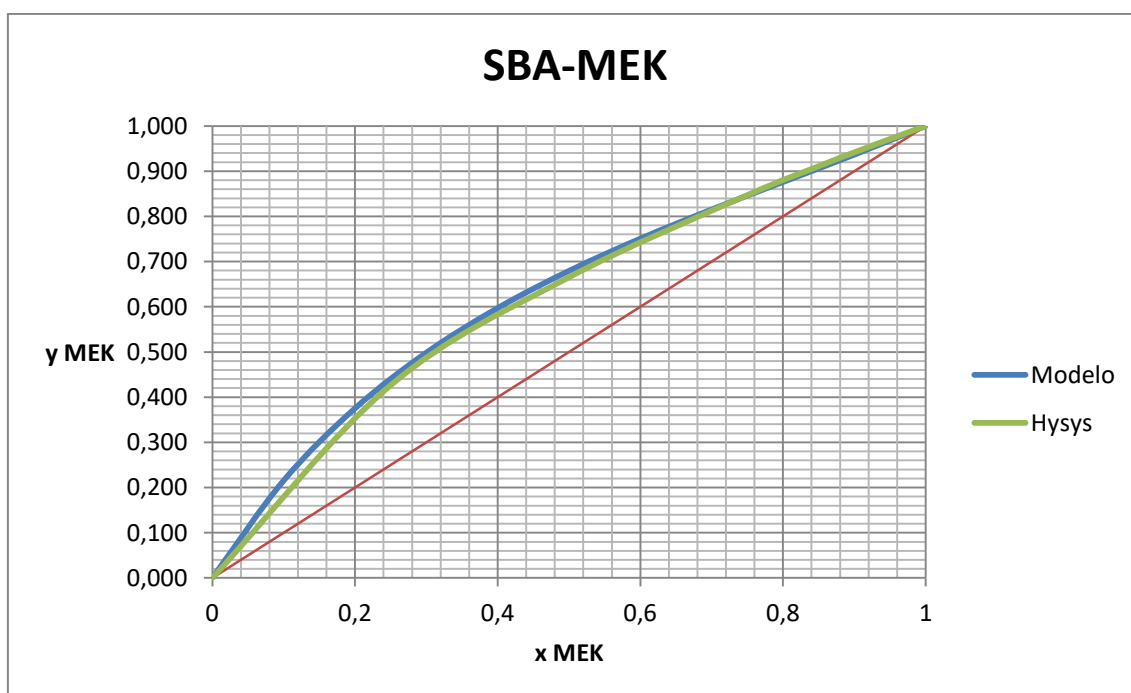


Figura 32 - Sistema butan-2-ol/butan-2-ona

En la figura se observa como en la región de operación de la sección de rectificación la predicción de *Hysys* tiene una volatilidad relativa superior que la del modelo, mientras que en la zona de la región de operación de la sección de agotamiento ocurre lo contrario.

Por ello se decidió aumentar el reflujo dentro de un límite razonable, de forma que se redujese el número de etapas requerido. El valor final del reflujo es de 2,46; con el que se obtiene la relación entre claves (LK/HK) de la alimentación en 31 platos de la sección de rectificación.

A continuación se muestra un ejemplo del cálculo etapa a etapa en la sección de rectificación, para los dos primeros platos, presentados en la figura 33.

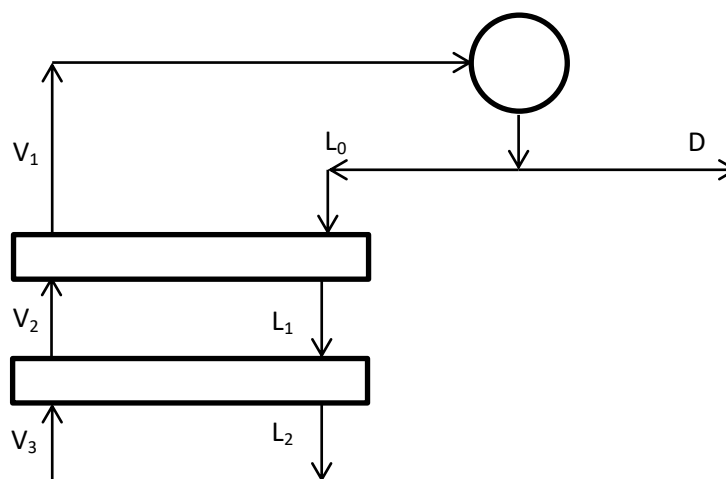


Figura 33 - Esquema de los dos primeros platos de la columna

Conocido el caudal de destilado y la relación de reflujo, se aplican las ecuaciones 18 y 19 para calcular el flujo molar de vapor saliente del primer plato,  $V_1$ , y el líquido entrante,  $L_0$ , tabla 29.

Tabla 29 - Flujos molares

	$V_1$	$L_0$
$F_1$ (kmol/h)	124,9586	88,8167

La temperatura de la corriente  $V_1$ , del plato, y de la corriente  $L_1$  así como la composición de esta última, se pueden determinar mediante un cálculo de temperatura de rocío a la corriente  $V_1$ . En la tabla 30 se muestran los valores iterativos de temperatura y composición, obtenidos mediante el procedimiento expuesto en la sección 1.4.7:

Tabla 30 - Iteración para la temperatura de rocío, corriente  $V_1$

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2
$T$ (°C)	79,66	79,60	79,60
$X_{\text{agua}}$	0,0023	0,0003	0,0003
$X_{\text{SBA}}$	0,0043	0,0029	0,0029
$X_{\text{MEK}}$	0,9934	0,9969	0,9969

A continuación se obtiene la temperatura de la corriente  $L_0$ , mediante un cálculo de temperatura de burbuja. Se muestran los valores iterados en la tabla 31.

Tabla 31 - Iteración para la temperatura de burbuja de la corriente  $L_0$

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2
$T$ (°C)	79,66	79,52	79,52

## Anexo II: Cálculos Justificativos

En este punto se conocen las composiciones de todas las corrientes en el primer plato, exceptuando la de  $V_2$ . Se estima con el balance de materia suponiendo que los flujos molares permanecen constantes, aplicando la ecuación 23. El resultado se indica en la tabla 32.

**Tabla 32 - Composición de  $V_2$  estimada**

	$Y_2$
<b>Agua</b>	0,0005
<b>SBA</b>	0,0026
<b>MEK</b>	0,9969

Con esta composición se realiza un cálculo de temperatura de rocío análogo al de la corriente  $V_1$ , presentado en la tabla 33.

**Tabla 33 - Iteración para la temperatura de rocío de la corriente  $V_2$**

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2
<b>T (°C)</b>	79,66	79,63	79,63
<b><math>X_{\text{agua}}</math></b>	0,0011	0,0001	0,0001
<b><math>X_{\text{SBA}}</math></b>	0,0057	0,0038	0,0038
<b><math>X_{\text{MEK}}</math></b>	0,9932	0,9961	0,9961

Conocida esta temperatura, el plato está totalmente definido de forma provisional, con lo que se pueden calcular las entalpías de todas las corrientes, aplicando las ecuaciones 26 y 27, y los datos de la sección 1.7.3. Los resultados se indican en la tabla 34.

**Tabla 34 - Entalpías de las corrientes del primer plato**

	$V_1$	$L_0$	$L_1$	$V_2$
<b><math>h/H</math> (kJ/kmol)</b>	43935,0	12659,5	12681,6	43946,1

Con estos datos de entalpía, se calcula el valor de los flujos  $L_1$  y  $V_2$ , abandonando la suposición de flujos molares constantes. Para ello, se aplican simultáneamente los balances de materia y de energía, ecuaciones 24 y 25. Se obtienen los resultados mostrados en la tabla 35.

**Tabla 35 - Flujos molares calculados (balance de materia y energía)**

	$L_1$	$V_2$
<b><math>F_i</math> (kmol/h)</b>	88,8352	124,9771

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Con estos flujos molares se vuelve realizar el balance de materia, ecuación 28, para recalcular la composición de la corriente  $V_2$ . En la tabla 36 se muestra el valor junto con el valor previo, obtenido con la suposición de flujos molares constantes:

**Tabla 36 - Composición de la corriente  $V_2$**

	$Y_2$	$y_2$ (flujos cte)
<b>Agua</b>	0,0005	0,0005
<b>SBA</b>	0,0026	0,0026
<b>MEK</b>	0,9969	0,9969

Se puede observar que la composición es idéntica para ambos casos, ya que el cambio en los flujos molares es pequeña, y además la relación  $L/V$  permanece prácticamente constante, como ya se indicó en la sección 1.7.8. Dado que la composición obtenida es igual a la que se tenía anteriormente, se da por alcanzada la convergencia en el plato

En el segundo plato se tienen totalmente definidas las corrientes  $V_2$  y  $L_1$ . Además, dado que en la etapa anterior se realizó un cálculo de temperatura de rocío a la corriente  $V_2$ , se tiene también definida la composición y temperatura de la corriente  $L_2$  (tabla 33). Se puede realizar por tanto el balance de materia suponiendo flujos molares constantes, ecuación 23, para obtener una estimación de la composición  $V_3$ , expuesta en la tabla 37.

**Tabla 37 - Composición de  $V_3$  estimada**

	$Y_3$
<b>Agua</b>	0,0004
<b>SBA</b>	0,0033
<b>MEK</b>	0,9963

Con esta composición se realiza un cálculo de temperatura de rocío, análogo al del plato anterior. Los resultados se muestran en la tabla 38.

**Tabla 38 - Iteración para la temperatura de rocío en la corriente  $V_3$**

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2
<b>T (°C)</b>	79,67	79,64	79,64
<b><math>X_{\text{agua}}</math></b>	0,0009	0,0001	0,0001
<b><math>X_{\text{SBA}}</math></b>	0,0072	0,0048	0,0048
<b><math>X_{\text{MEK}}</math></b>	0,9920	0,9951	0,9951

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Calculada la composición de  $V_3$  y su temperatura, el plato está totalmente definido, con lo que se puede proceder a determinar las entalpías, cuyos valores se indican en la tabla 39.

Tabla 39 - Entalpías de las corrientes en el tercer plato

	$V_2$	$L_1$	$L_2$	$V_3$
<b>h/H (kJ/kmol)</b>	43946,1	12681,6	12690,4	43957,3

Con ellas, se pueden aplicar simultáneamente el balance de materia y el de energía, de manera idéntica al plato anterior, para recalcular la composición de  $V_3$  y determinar los valores de los flujos molares de las corrientes  $L_2$  y  $V_3$ . Se muestran los resultados en las tablas 40 y 41.

Tabla 40 - Flujos molares calculados

	$L_2$	$V_3$
<b><math>F_i</math> (kmol/h)</b>	88,8154	124,9573

Tabla 41 - Composición de la corriente  $V_3$

	$y_3$	$y_3$ (flujos cte)
<b>Agua</b>	0,0004	0,0004
<b>SBA</b>	0,0033	0,0033
<b>MEK</b>	0,9963	0,9963

De nuevo, el cambio en la composición es inapreciable, por lo que se considera alcanzada la convergencia en el plato.

Los cálculos se continúan de manera análoga a lo largo de la columna, hasta que en la corriente líquida que abandona el plato se alcance la misma relación entre ligero clave y pesado clave (LK/HK) que en la alimentación.

En la tabla 42 se muestran las composiciones de las corrientes de líquido y vapor que abandonan cada plato, así como sus flujos molares y temperatura, hasta el plato 31, donde se alcanza la relación LK/HK mencionada.

Anexo II: Cálculos Justificativos

Tabla 42 - Tabla resumen de las condiciones en los platos de la sección de rectificación

N plato	T plato	V	L	Y <sub>Agua</sub>	Y <sub>SBA</sub>	Y <sub>MEK</sub>	X <sub>Agua</sub>	X <sub>SBA</sub>	X <sub>MEK</sub>	LK/HK
1	79,60	124,9586	88,8352	0,0011	0,0019	0,9970	0,0003	0,0029	0,9969	348,835
2	79,63	124,9771	88,8154	0,0005	0,0026	0,9969	0,0001	0,0038	0,9961	261,360
3	79,64	124,9573	88,7876	0,0004	0,0033	0,9963	0,0001	0,0048	0,9951	206,900
4	79,65	124,9295	88,7571	0,0004	0,0040	0,9956	0,0001	0,0059	0,9940	169,721
5	79,66	124,8990	88,7249	0,0004	0,0047	0,9949	0,0001	0,0070	0,9929	142,719
6	79,67	124,8668	88,6909	0,0004	0,0055	0,9941	0,0001	0,0081	0,9918	122,215
7	79,68	124,8328	88,6551	0,0004	0,0063	0,9933	0,0001	0,0093	0,9906	106,112
8	79,70	124,7970	88,6173	0,0004	0,0072	0,9924	0,0001	0,0106	0,9893	93,129
9	79,71	124,7592	88,5773	0,0004	0,0081	0,9915	0,0001	0,0120	0,9879	82,436
10	79,73	124,7192	88,5350	0,0004	0,0091	0,9905	0,0001	0,0134	0,9865	73,475
11	79,74	124,6769	88,4901	0,0004	0,0101	0,9895	0,0001	0,0150	0,9849	65,856
12	79,76	124,6320	88,4424	0,0004	0,0112	0,9884	0,0001	0,0166	0,9833	59,297
13	79,78	124,5843	88,3916	0,0004	0,0123	0,9873	0,0001	0,0183	0,9816	53,591
14	79,79	124,5335	88,3373	0,0004	0,0136	0,9861	0,0001	0,0202	0,9797	48,580
15	79,81	124,4792	88,2792	0,0004	0,0149	0,9847	0,0001	0,0221	0,9778	44,145
16	79,84	124,4211	88,2168	0,0004	0,0163	0,9833	0,0001	0,0243	0,9756	40,191
17	79,86	124,3587	88,1498	0,0004	0,0178	0,9818	0,0001	0,0266	0,9733	36,643
18	79,89	124,2917	88,0774	0,0004	0,0194	0,9802	0,0001	0,0290	0,9709	33,442
19	79,91	124,2193	87,9990	0,0004	0,0212	0,9785	0,0001	0,0317	0,9682	30,539
20	79,94	124,1409	87,9140	0,0004	0,0231	0,9766	0,0001	0,0346	0,9653	27,894
21	79,98	124,0559	87,8213	0,0004	0,0251	0,9745	0,0001	0,0378	0,9621	25,475
22	80,01	123,9632	87,7199	0,0004	0,0274	0,9723	0,0001	0,0412	0,9587	23,253
23	80,05	123,8618	87,6085	0,0004	0,0298	0,9698	0,0001	0,0450	0,9549	21,206
24	80,10	123,7504	87,4857	0,0004	0,0325	0,9671	0,0001	0,0492	0,9507	19,315
25	80,15	123,6276	87,3495	0,0004	0,0355	0,9642	0,0001	0,0539	0,9460	17,563
26	80,20	123,4914	87,1978	0,0004	0,0388	0,9609	0,0001	0,0590	0,9409	15,935
27	80,27	123,3397	87,0278	0,0004	0,0424	0,9572	0,0001	0,0648	0,9351	14,421
28	80,34	123,1697	86,8363	0,0004	0,0465	0,9531	0,0001	0,0714	0,9285	13,009
29	80,42	122,9782	86,6191	0,0004	0,0511	0,9485	0,0001	0,0788	0,9211	11,691
30	80,51	122,7610	86,3711	0,0004	0,0564	0,9433	0,0001	0,0873	0,9126	10,460
31	80,62	122,5130	86,0857	0,0004	0,0623	0,9373	0,0001	0,0970	0,9029	9,309

A continuación se van a detallar los cálculos para las tres últimas etapas de la columna, esquematizadas en la figura 34. Para iniciar el cálculo es necesario obtener valores de flujo molar de líquido y vapor al último plato de la columna:

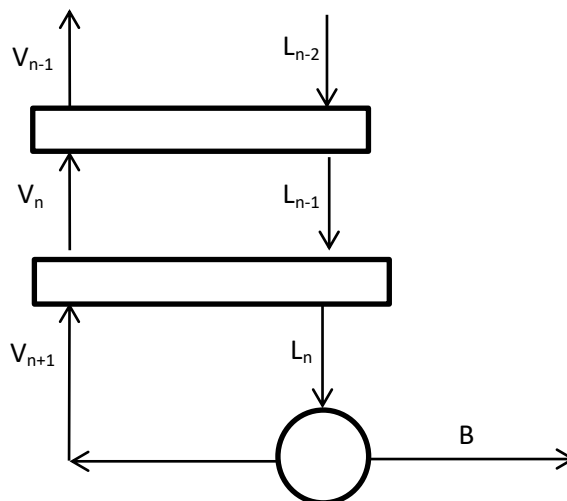


Figura 34 - Esquema de los últimos 2 platos de la columna

Dado que como se ha visto en la simulación preliminar los flujos molares en la sección de agotamiento no son constantes, no se pueden utilizar para el cálculo los valores que se obtendrían a partir del balance de materia y energía al plato de alimentación. Para determinar por tanto unos valores que permitan iniciar el cálculo en la última etapa, se utiliza inicialmente una relación de *boilup* igual a la proporcionada por *Hysys* en la simulación detallada, con el que se alcanza la relación de LK/HK de la alimentación en el líquido incidente al plato en aproximadamente 12 platos. Posteriormente, se ajusta este valor del *boilup*, de forma que se alcance la relación LK/HK de forma exacta, en 11 platos más el calderín.

El procedimiento de cálculo comienza determinando los flujos molares de las corrientes  $V_{n+1}$  y  $L_n$  a través de las ecuaciones 29 y 30. Posteriormente, se calcula la temperatura de burbuja de la corriente de producto de colas (figuras 43 y 44), como se indica en la sección 1.4.8:

Tabla 43 - Iteración para la temperatura de burbuja en la corriente de colas<sup>1</sup>

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6
T (°C)	99,30	99,02	99,11	99,08	99,09	99,09	99,09

<sup>1</sup> Se realizan varias iteraciones una vez alcanzada la convergencia en T para alcanzar también la convergencia en las presiones de saturación.

Tabla 44 - Composición del vapor en equilibrio con colas,  $V_{n+1}$

	$Y_{n-1}$
<b>Agua</b>	0
<b>SBA</b>	0,9752
<b>MEK</b>	0,0248

Aplicando un balance de materia a la caldera (ecuación 31), se puede calcular la composición de la corriente  $L_n$ , presentada en la tabla 45.

Tabla 45 - Composición de la corriente  $L_n$

	$x_n$
<b>Agua</b>	0
<b>SBA</b>	0,9757
<b>MEK</b>	0,0243

Conocida la composición de la corriente, se realiza un cálculo de temperatura de burbuja análogo al anterior, cuyos resultados se muestran en las tablas 46 y 47.

Tabla 46 - Iteración para la temperatura de burbuja de la corriente  $L_n$

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6
<b>T (°C)</b>	99,02	98,37	98,57	98,51	98,52	98,52	98,52

Tabla 47 - Composición de la corriente de vapor en equilibrio con  $L_n$ ,  $V_n$

	$Y_n$
<b>Agua</b>	0
<b>SBA</b>	0,9411
<b>MEK</b>	0,0589

En este punto, se tienen definidas las temperaturas y composiciones de todas las corrientes excepto de la corriente  $L_{n-1}$ . De manera análoga a los cálculos condensador-alimentación, se consideran constantes los flujos molares y se estima la composición de la corriente desconocida, obteniendo los resultados indicados en la tabla 48.

Tabla 48 - Composición de la corriente  $L_{n-1}$  estimada

	$x_{n-1}$
<b>Agua</b>	0
<b>SBA</b>	0,9429
<b>MEK</b>	0,0571

Con esta composición, se realiza otro cálculo de temperatura de burbuja (tablas 49 y 50)

Tabla 49 - Iteración para la temperatura de burbuja en la corriente  $L_{n-1}$

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6
T (°C)	98,36	96,97	97,36	97,25	97,28	97,27	97,27

Tabla 50 - Composición de la corriente en equilibrio con  $L_{n-1}$ ,  $V_{n-1}$

	$y_{n-1}$
Agua	0
SBA	0,8686
MEK	0,1315

Definidas todas las composiciones y temperaturas de las corrientes, se determinan las entalpías, que se muestran en la tabla 51.

Tabla 51 - Entalpías de las corrientes del último plato

	$V_n$	$L_{n-1}$	$L_n$	$V_{n+1}$
h/H (kJ/kmol)	61089,8	20579,1	21022,8	61237,0

Con los valores indicados en la tabla 51 se aplican simultáneamente los balances de materia y energía, ecuaciones 33 y 34, para determinar unos nuevos caudales molares de  $V_n$  y  $L_{n-1}$  (tabla 52), con los que se recalcula la composición de la corriente  $L_{n-1}$  (tabla 53).

Tabla 52 - Flujos molares calculados

	$V_n$	$L_{n-1}$
$F_i$ (kmol/h)	124,9586	88,8167

Tabla 53 - Composición de la corriente  $L_{n-1}$  calculada

	$x_{n-1}$	$x_{n-1}$ (flujos cte)
Agua	0	0
SBA	0,9429	0,9429
MEK	0,0571	0,0571

Dado que la composición estimada y la recalculada son idénticas, se da el plato por convergido.

## Anexo II: Cálculos Justificativos

En el plato anterior se tienen definidos los flujos molares de las corrientes  $V_n$  y  $L_{n-1}$ , así como las composiciones y temperaturas de ambas. Además, al haberse realizado el cálculo de temperatura de burbuja de esta última, se conoce también la composición y temperatura de la corriente  $V_{n-1}$ . En la tabla 54 se muestra el valor estimado de la composición de la única corriente desconocida,  $L_{n-2}$ , suponiendo los flujos molares constantes.

Tabla 54 - Composición estimada de  $L_{n-2}$

	$x_{n-2}$
<b>Agua</b>	0
<b>SBA</b>	0,8731
<b>MEK</b>	0,1269

Conocida la composición, se realiza un cálculo de temperatura de burbuja (tablas 55 y 56)

Tabla 55 - Iteración para la temperatura de burbuja en la corriente  $L_{n-2}$

	Inicio	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6
<b>T (°C)</b>	96,97	94,37	94,99	94,84	94,88	94,87	94,87

Tabla 56 – Composición de la corriente en equilibrio con  $L_{n-2}$ ,  $V_{n-2}$

	$y_{n+1}$
<b>Agua</b>	0
<b>SBA</b>	0,7370
<b>MEK</b>	0,2630

Conocida la temperatura y composición de la corriente, se pueden determinar todas las entalpías, mostradas en la tabla 57.

Tabla 57 - Entalpías de las corrientes del antepenúltimo plato

	$V_{n-1}$	$L_{n-2}$	$L_{n-1}$	$V_n$
<b>h/H (kJ/kmol)</b>	59738,7	19727,6	20579,1	61089,8

Con las cuales, igual que en el plato anterior, se aplican simultáneamente los balances de materia y energía, ecuaciones 33 y 34, para recalcular los valores de flujo molar, mostrados en la tabla 58, y la composición de la corriente  $L_{n-2}$ , en la tabla 59.

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Tabla 58 - Flujos molares calculados

	$V_{n-1}$	$L_{n-2}$
<b><math>F_i</math> (kmol/h)</b>	99,4415	103,2842

Tabla 59 - Composición de la corriente  $L_{n-2}$  calculada

	$x_{n-2}$	$x_{n-2}$ (flujos cte)
<b>Agua</b>	0	0
<b>SBA</b>	0,7370	0,7370
<b>MEK</b>	0,2630	0,2630

Como se observa en la tabla 59, tanto la composición estimada con flujos constantes, como la calculada son idénticas, por lo que se da por alcanzada la convergencia en el plato.

Se continúan los cálculos de forma análoga hasta que se alcanza la relación LK/HK de la alimentación en el líquido incidente al plato. En la tabla 60, mostrada en la siguiente página, se muestra un resumen de las condiciones en los platos de la sección de agotamiento.

Anexo II: Cálculos Justificativos

Tabla 60 - Tabla resumen de la condiciones en los platos de la sección de agotamiento

N plato	T plato	V	L	Y Agua	Y SBA	Y MEK	X Agua	X SBA	X MEK	LK/HK
32	80,72	124,2311	127,6496	0	0,0694	0,9306	0	0,1070	0,8930	9,309
33	80,91	123,8069	126,9514	0	0,0796	0,9204	0	0,1235	0,8765	8,345
34	81,22	123,1087	125,7938	0	0,0965	0,9035	0	0,1510	0,8490	7,096
35	81,77	121,9511	123,8668	0	0,1245	0,8755	0	0,1971	0,8029	5,624
36	82,74	120,0241	120,7123	0	0,1717	0,8283	0	0,2745	0,7255	4,074
37	84,49	116,8696	115,9721	0	0,2510	0,7490	0	0,3989	0,6011	2,643
38	87,43	112,1294	110,3099	0	0,3787	0,6213	0	0,5704	0,4296	1,507
39	91,34	106,4672	105,7128	0	0,5553	0,4447	0	0,7462	0,2539	0,753
40	94,99	101,8701	103,2837	0	0,7370	0,2631	0	0,8731	0,1269	0,340
41	97,27	99,4410	102,2012	0	0,8686	0,1315	0	0,9429	0,0571	0,145
42	98,52	98,3585	102,9695	0	0,9411	0,0589	0	0,9757	0,0243	0,061

### 1.7.10. Perfiles de la columna

A continuación se presentan gráficamente los perfiles de temperatura, flujo, y composiciones para los cálculos realizados etapa a etapa en la columna. Además, se va a realizar la comparativa con los perfiles obtenidos en la simulación preliminar en *Hysys*.

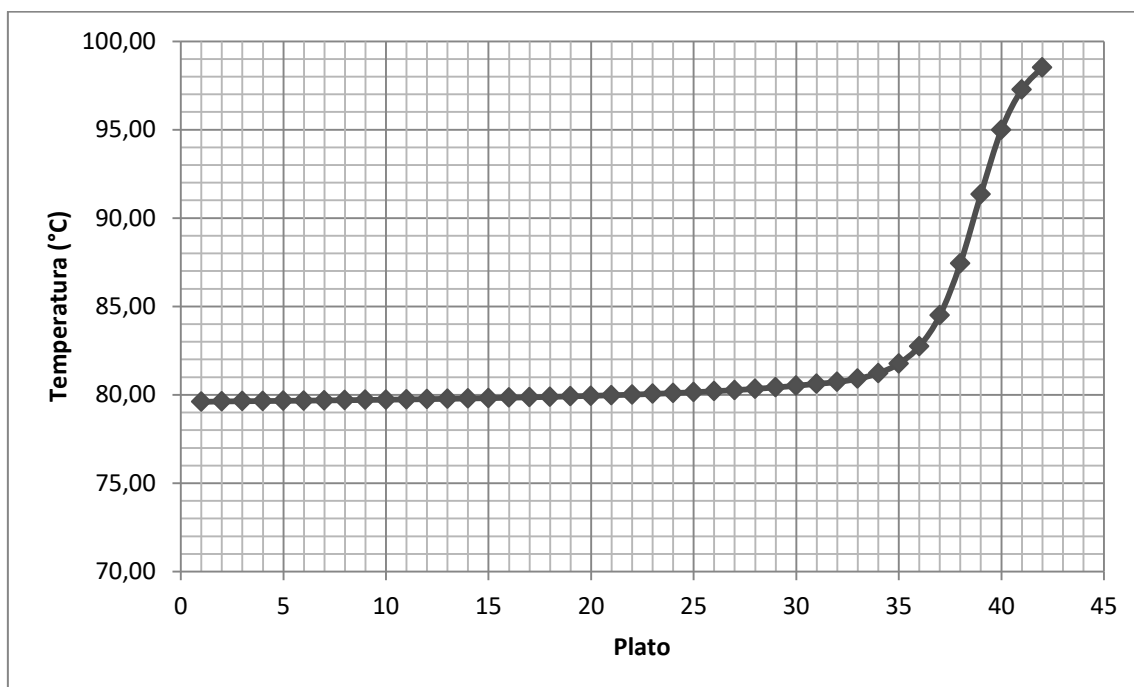


Figura 35 - Perfil de temperaturas en la columna

En la figura 35 se muestra el perfil de temperatura obtenido en los cálculos etapa a etapa. Se puede observar que es muy similar a la predicción de la simulación (figura 29), aunque con un mayor número de platos en la etapa de rectificación. Esto se debe a que la pequeña diferencia en la predicción del equilibrio, observada en la figura 32, se ve magnificada al trabajar en concentraciones muy altas de butan-2-ona: dado que la concentración es alta, las composiciones de dos corrientes en equilibrio líquido-vapor son muy similares, lo que genera poco cambio de composición entre platos, con lo que un pequeño aumento en la volatilidad relativa genera un cambio significativo el número de platos.

En la figura 36 se muestra el perfil calculado de los flujos molares de las corrientes de líquido y vapor a lo largo de la columna. Se observa el efecto de la alimentación subenfriada, que condensa parte del vapor ascendente, y genera un aumento brusco en el caudal de líquido. El perfil es similar al obtenido en la simulación preliminar (figura 31), y análogo al de temperaturas (figura 35): la sección de rectificación presenta flujos constantes, mientras que se observa un cambio pronunciado en la sección de agotamiento.

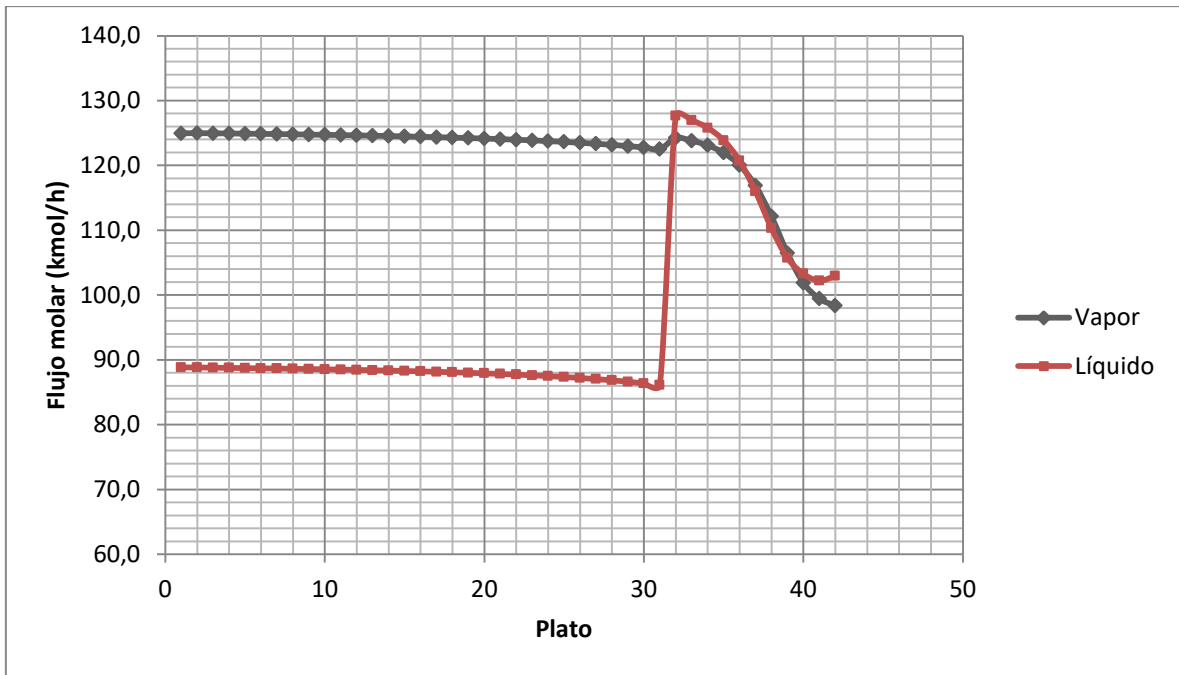


Figura 36 - Perfil de flujos molares en la columna

Se presentan también los perfiles de composición de butan-2-ol y butan-2-ona en la columna, figura 37.

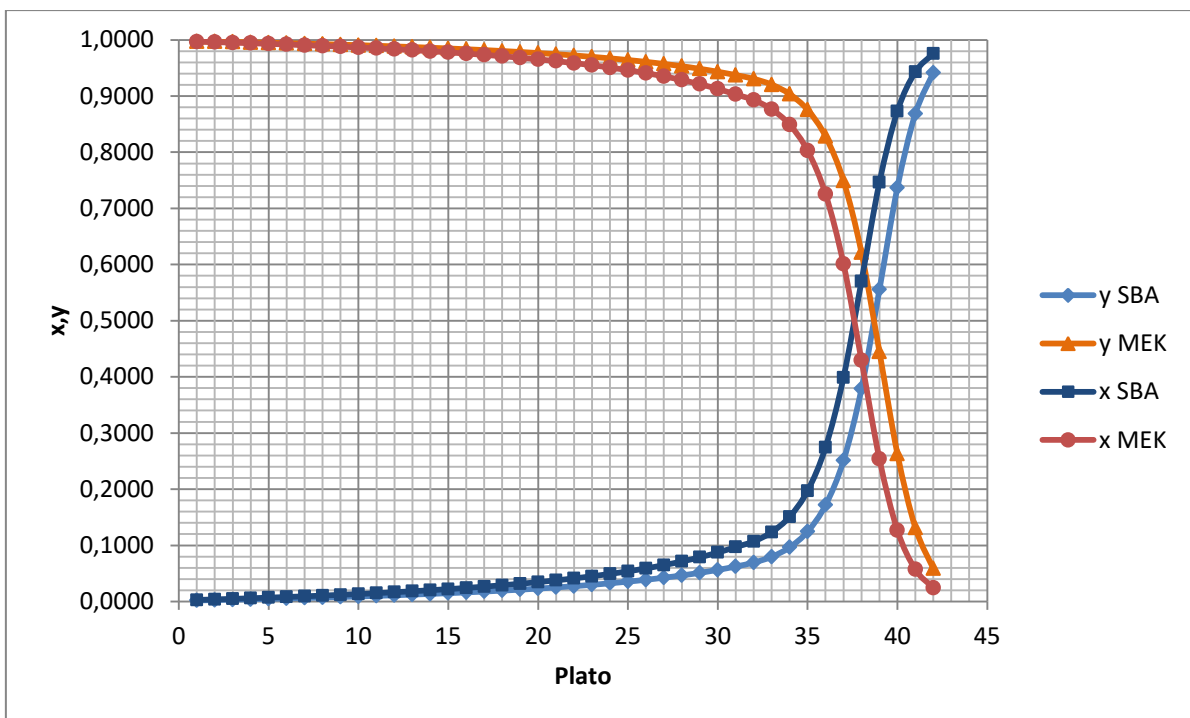


Figura 37 - Perfiles de composición de butan-2-ol/butan-2-ona en la columna

Para facilitar la visualización de los datos, se incluyen las figuras 38 y 39, que presentan los datos de composición en ambas fases de butan-2-ona y butan-2-ol en los 30 primeros platos.

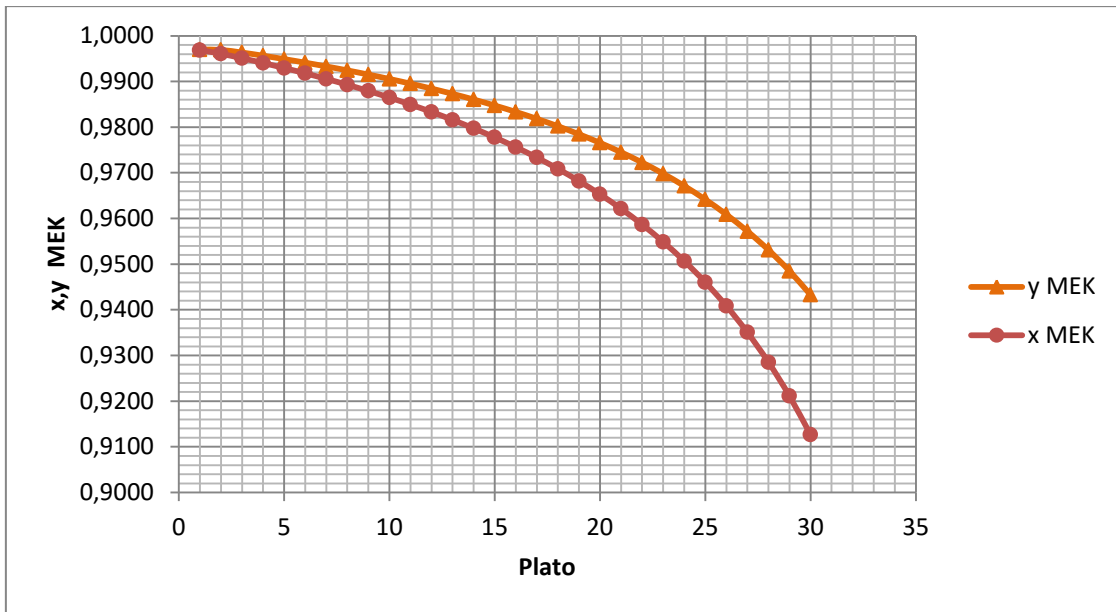


Figura 38 - Composiciones de butan-2-ona, 30 primeros platos

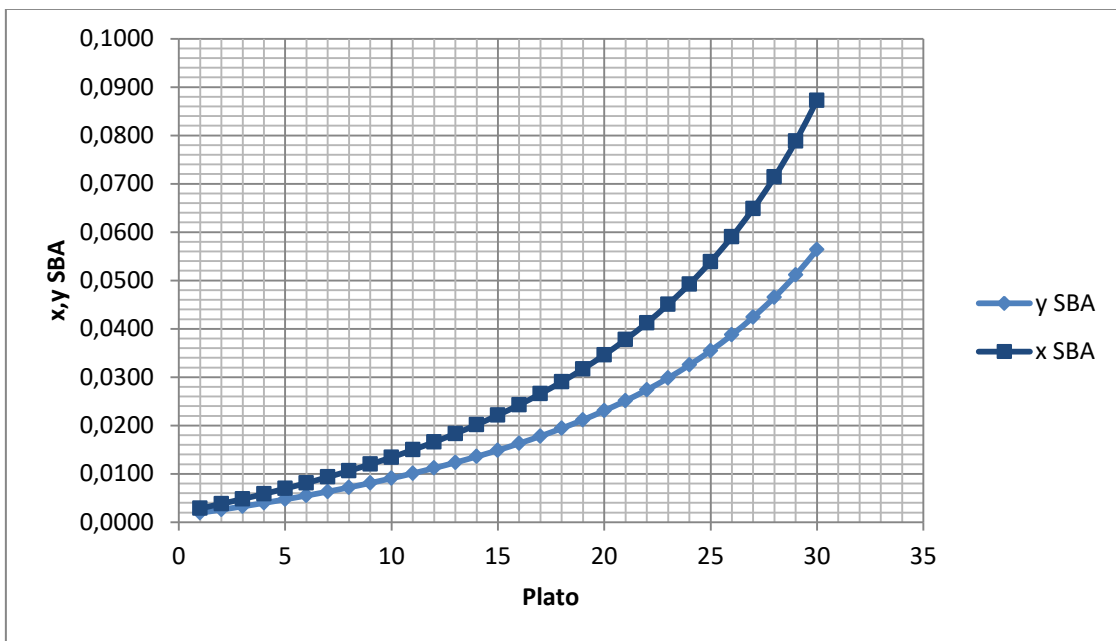


Figura 39 - Composiciones de butan-2-ol, 30 primeros platos

Comparando la figura 37 con la predicción de la simulación, figura 30, se observa una situación análoga a la de los perfiles de temperatura y flujo, con una de los perfiles similar, pero con un mayor número de platos en la sección de rectificación.

El perfil de composiciones para el agua se incluye separado en la figura 40 para facilitar la visualización. Si se compara con el obtenido en la simulación preliminar, figura 41, se observa como el cambio entorno a la alimentación es mucho más brusco, ya que al no haber reparto de agua, el método etapa a etapa predice una fracción molar de 0 en toda la sección de

## Anexo II: Cálculos Justificativos

agotamiento. Por el contrario, *Hysys* es capaz de calcular composiciones de agua en la sección de agotamiento, con lo que el cambio en torno a la alimentación se suaviza.

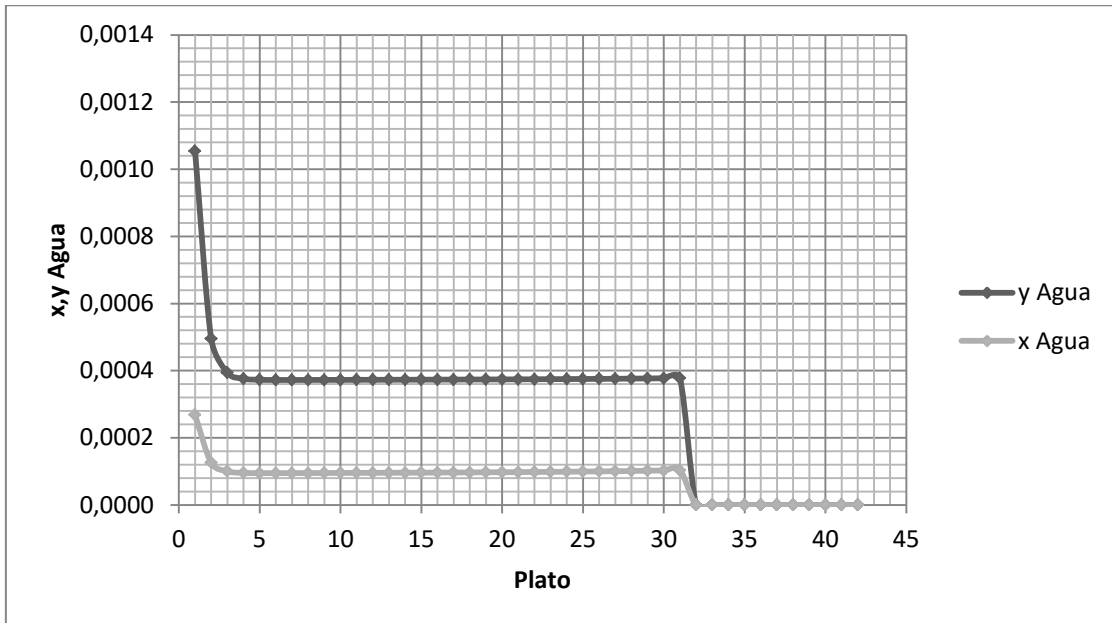


Figura 40 - Perfil de composiciones de agua en la columna

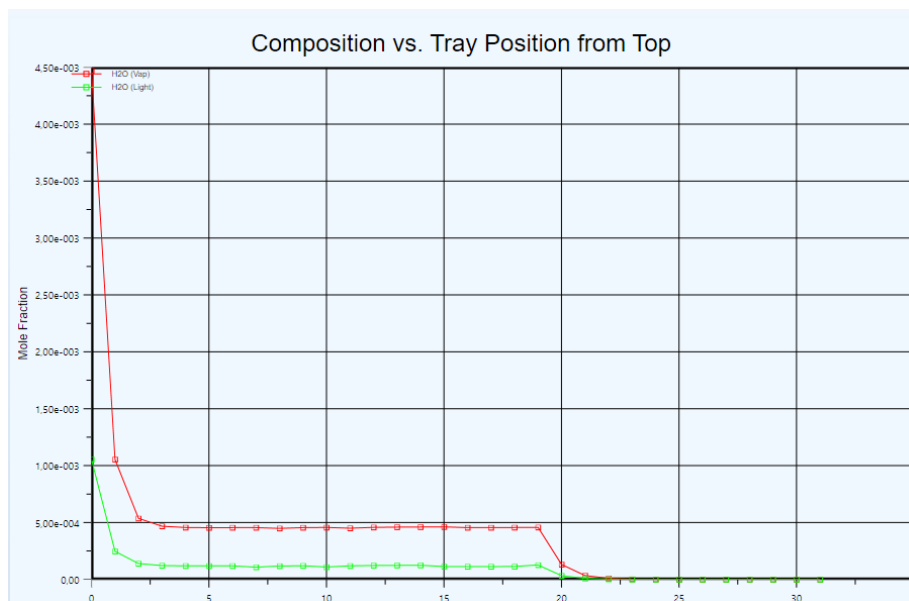


Figura 41 - Perfil de composiciones de agua (*Aspen Hysys*)

### 1.7.11. Diseño hidráulico

El diseño hidráulico debe garantizar una operación adecuada para todo el rango de flujos en la columna. Dado que se distinguen claramente dos zonas en el perfil de flujo (figura 36), se va a diseñar para ambas.

El primer punto de diseño es en la sección de rectificación, concretamente para el primer plato de la columna. Ya que los flujos en esta zona son constantes, el diseño será válido para toda ella. El segundo punto será aquel plato con mayor probabilidad de operar en condiciones de inundación, es decir, aquel donde la relación entre los flujos de vapor y líquido sea inferior (V/L). En este caso, se trata del último plato de la columna. Realizando un diseño adecuado para este plato, se garantiza que el resto de la sección de agotamiento se trabaje siempre por encima de las condiciones de inundación, ya que la relación V/L será superior.

Las propiedades físicas se estiman con *Aspen Hysys*. En la zona 1 se van a estimar con la composición del líquido en el primer plato, presión atmosférica, y la temperatura obtenida para el plato 1 en los cálculos etapa a etapa. Se muestran en la tabla 61.

Tabla 61 - Propiedades físicas en el primer plato

Propiedades zona 1		
T	79,60	°C
P	101,3	kPa
$\rho_v$	2,498	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_l$	763,7	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	19,18	dinas/cm
	0,019	N/m

Para estimar las propiedades en el último plato de la columna es necesaria una aproximación de la caída de presión a lo largo de la columna, para tener una presión de fondos. Se toma como valor aproximado una caída de 100 mmH<sub>2</sub>O por plato, que se traducen a kPa como:

$$\Delta P (kPa) = \frac{\Delta P (mmH_2O)}{1000} * 9,81 \quad (93)$$

Se estima una eficacia del plato de 0,6; con lo que teniendo 42 platos teóricos, se obtienen:

$$N_{reales} = \frac{N_{teoricas}}{0,6} \quad (94)$$

70 platos reales.

Anexo II: Cálculos Justificativos

Con lo que la caída de presión total resulta:

$$\Delta P_{columna} = \Delta P_{plato} * N_{reales} \quad (95)$$

y la presión en el fondo de la columna es la suma de la presión en cabezas más la caída de presión total. La temperatura obtenida en los cálculos etapa a etapa no tenía en cuenta la caída de presión, con lo que se realiza un cálculo de temperatura de burbuja para obtener una nueva estimación. Los resultados se indican en la tabla 62.

Tabla 62 - Propiedades físicas en el último plato

Propiedades zona 2		
T	101	°C
P	170,0	kPa
$\rho_v$	3,876	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_l$	709,4	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	13,11	dinas/cm
	0,013	N/m

Estimadas las propiedades físicas en ambos platos, se recopilan en la tabla 63 los flujos molares en ambas zonas.

Tabla 63 -Flujos molares en ambas zonas de diseño

	Zona 1	Zona 2	
$L_m$	88,8352	102,9695	kmol/h
$V_m$	124,9586	98,3585	kmol/h

Que conocidas las composiciones de las corrientes líquido y vapor, y los pesos molares, se pueden transformar a flujos másicos, mostrados en la tabla 64.

Tabla 64 - Flujos másicos en ambas zonas de diseño

	Zona 1	Zona 2	
$L_w$	6404,86	7419,36	kg/h
$V_w$	9256,25	7279,04	kg/h

Y con las densidades se obtienen los flujos volumétricos, que se exponen en la tabla 65.

Tabla 65 - Flujos volumétricos en ambas zonas de diseño

	Zona 1	Zona 2	
L	8,387	10,459	m <sup>3</sup> /h
V	3705,47	1877,98	m <sup>3</sup> /h

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Una vez conocidos todos los flujos y las propiedades físicas en ambas zonas de diseño, se procede al cálculo de las velocidades de inundación. Para ello se determinan los parámetros de flujo  $F_{lv}$ , con los que se obtienen las constantes  $K_1$  de la figura 14 (suponiendo un espaciado de 0,45 m entre platos). Estas constantes se corrigen mediante la ecuación 38, y finalmente se aplica la ecuación 36 para determinar la velocidad de inundación  $u_f$ . Los resultados se muestran en la tabla 66.

**Tabla 66 - Parámetros y velocidades de inundación**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
$F_{lv}$	0,040	0,075	
<b>Espaciado</b>	0,45	0,45	m
$K_1$	0,050	0,035	
$K_1'$	0,050	0,032	
$u_f$	0,866	0,434	m/s

Se supone un porcentaje de inundación del 85%, con el que se calcula la velocidad  $\hat{u}_v$  mediante la ecuación 39. Con ella se puede determinar el área neta de la columna (ecuación 40), y su diámetro. Los resultados se indican en la tabla 67

**Tabla 67 - Calculo del diámetro de la columna**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
%inundación	85	85	%
$\hat{u}_v$	0,736	0,369	m/s
$A_n$	1,40	1,41	m <sup>2</sup>
$D_c$	1,42	1,43	m

Aplicando las ecuaciones 41-44 se puede realizar una primera estimación de las áreas del plato. Generalmente, como se indica en la ecuación 44, se toma el área total de los agujeros  $A_h$  como un 10% del área activa  $A_a$ ; sin embargo dado que los flujos de vapor son bajos, es necesario aumentar la velocidad del vapor para evitar goteo, con lo que se toman relaciones inferiores al 10%. En la tabla 68 se muestran los valores finales.

**Tabla 68 - Geometría del plato**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
$A_c$	1,59	1,61	m <sup>2</sup>
$A_d$	0,19	0,19	m <sup>2</sup>
$A_n$	1,40	1,41	m <sup>2</sup>
$A_a$	1,02	1,03	m <sup>2</sup>
$A_h$	0,07	0,04	m <sup>2</sup>
$l_w$	1,01	1,02	m
$d_h$	5	5	mm
<b>t plato</b>	5	5	mm

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Una vez estimada la geometría del plato se debe comprobar el goteo. Se supone una altura de rebosadero  $h_w$  de 45 mm y se calcula la altura de cresta de líquido sobre el rebosadero,  $h_{ow}$ , mediante la ecuación 45. Los cálculos para el goteo (tabla 69) se realizan para un ratio de reducción del 70% de los valores de flujo máximo, para garantizar la seguridad en la operación.

**Tabla 69 - Geometría del rebosadero**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
$L_w$	1,779	2,061	kg/s
$L_w$ 70%	1,245	1,443	kg/s
$h_{ow}$	10,29	11,88	mm líquido
$h_w$	45	45	mm

Se obtiene la constante  $K_2$  de la figura 15, y con ella se calcula la velocidad en condiciones de goteo  $\hat{u}_h$  mediante la ecuación 46, que se compara con la velocidad de vapor en los agujeros  $u_h$ , calculada mediante la ecuación 47, como se muestra en la tabla 70.

**Tabla 70 - Velocidades de vapor, comprobación del goteo**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
<b>K2</b>	30	31,5	
$\hat{u}_h$	7,36	6,67	m/s
$u_h$ 70%	10,12	8,88	m/s

Se comprueba que las velocidades de vapor al 70% del flujo máximo son superiores a las del punto de goteo, por lo que se acepta el diseño. Cabe destacar que aunque sean relativamente próximas, se está diseñando para los platos de cada sección donde la relación  $V/L$  es mínima, con lo que se asegura un margen superior para el resto de platos.

A continuación, se calcula la caída de presión en los platos. Para ello se determinan cada uno de los términos de la ecuación 48, comenzando por la caída de presión a través del plato seco, que se muestra en la tabla 71. Se considera una relación entre el área de los agujeros,  $A_h$ , y el área perforada,  $A_p$ , igual a la relación entre el área de los agujeros y el área activa; con la que conocido el espesor del plato y el diámetro de los agujeros se obtiene el coeficiente de descarga  $C_0$  de la figura 16, que se aplica en la ecuación 49.

Tabla 71 - Caída de presión en el plato seco

	Zona 1	Zona 2	
<b>uh</b>	14,45	12,68	m/s
<b>t<sub>plato/d<sub>h</sub></sub></b>	1	1	
<b>A<sub>h</sub>/A<sub>p</sub></b>	0,07	0,04	
<b>C<sub>0</sub></b>	0,81	0,79	
<b>h<sub>d</sub></b>	53,1	71,8	mm líquido

La carga residual se toma igual a 12,5 mmH<sub>2</sub>O, y se convierte a mm de líquido con la ecuación 50. Conocidas ambas, se calcula la caída de presión total, que se indica en la tabla 72

Tabla 72 - Carga residual y caída de presión total

	Zona 1	Zona 2	
<b>h<sub>r</sub></b>	16,4	17,6	mm líquido
<b>h<sub>t</sub></b>	124,8	146,3	mm líquido
	163,4	206,2	mmH <sub>2</sub> O

A continuación, se comprueba el retorno de líquido en la bajante. Para ello se determina la pérdida de carga en la bajante (tabla 73), h<sub>dc</sub>, mediante la ecuación 52. Para calcular el área A<sub>m</sub> se va a utilizar una separación entre bajante y plato, h<sub>ap</sub>, de 35 mm.

Tabla 73 - Pérdida de carga en la bajante

	Zona 1	Zona 2	
<b>h<sub>ap</sub></b>	35	35	mm
<b>A<sub>ap</sub></b>	0,036	0,036	m <sup>2</sup>
<b>A<sub>d</sub></b>	0,19	0,19	m <sup>2</sup>
<b>A<sub>m</sub></b>	0,036	0,036	m <sup>2</sup>
<b>h<sub>dc</sub></b>	10,9	13,5	mm líquido

Una vez determinada, se calcula el retorno mediante la ecuación 51, que debe ser inferior a la mitad de la suma del espaciado entre platos y la altura del rebosadero. Además se comprueba el tiempo de residencia en la bajante, que debe ser superior a 3 segundos. Los resultados se exponen en la tabla 74.

Tabla 74 - Retorno de líquido en la bajante y tiempo de residencia

	Zona 1	Zona 2	
<b>h<sub>b</sub></b>	190,9	216,7	mm líquido
<b>Condición</b>	247,5	247,5	mm líquido
<b>t<sub>r</sub></b>	15,6	14,4	s

## Anexo II: Cálculos Justificativos

Posteriormente se determina el arrastre fraccional de líquido, que se muestra en la tabla 75. Para ello se determina la velocidad del vapor para la geometría determinada, mediante la ecuación 54, y se recalcula el porcentaje de inundación (que varía si se selecciona un diámetro estándar de tubería para la columna, en columnas con diámetros inferiores a 1-1,2 m). Conocida esta velocidad y el parámetro de flujo  $F_{IV}$ , se lee el arrastre fraccional en la figura 18:

**Tabla 75 - Arrastre fraccional**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
$u_v$	0,736	0,369	m/s
% inundación	85	85	
$F_{IV}$	0,040	0,075	
$\psi$	8,50E-02	4,90E-02	

Por último, se determinan los detalles geométricos del plato, que se muestran en la tabla 76: las áreas de la zona perforada, los anillos de soporte, y las zonas de calma; así como la distribución, número, y pitch de los agujeros. Para determinar el área perforada se determina el área de las zonas de calma y los anillos de los bordes, calculando el ángulo que comprenden los rebosaderos y aplicando las ecuaciones 57-59:

**Tabla 76 - Áreas de los bordes y perforada**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
$I_w/D_c$	0,76	0,76	
$\theta_c$	99	99	°
$\theta_b$	81	81	°
<b>Ancho bordes</b>	75	75	mm
$A_{bordes}$	0,134	0,134	m <sup>2</sup>
$A_{calma}$	0,163	0,164	m <sup>2</sup>
$A_p$	0,721	0,730	m <sup>2</sup>

En la tabla 77 se muestran el número de agujeros y el pitch, que se obtienen aplicando las ecuaciones 61 y 62:

**Tabla 77 - Parámetros de los agujeros**

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	
$I_p/d_h$	3,0	4,0	
$A_{agujero}$	1,96E-05	1,96E-05	m <sup>2</sup>
$N_{agujeros}$	3627,4	2095,3	agujeros

### 1.7.12. Diseño mecánico

Se definen las condiciones para el diseño mecánico: temperatura de diseño, presiones de diseño, y material de construcción.

La temperatura de diseño se estima a partir de la mayor temperatura alcanzada en el interior de la columna, de 98,52 °C en el último plato. Se suman 25 °C para garantizar la seguridad en la operación. La presión de operación varía a lo largo de la columna, y se van a tomar dos: por un lado la presión en cabezas, para la estimación inicial del espesor de la carcasa, y por otro la presión en fondos, para el análisis conjunto de esfuerzos. Las presiones en ambas zonas se sobreestiman en un 10% sobre la manométrica. Los valores se muestran en la tabla 78.

Tabla 78 - Presiones y temperatura de diseño

	Máxima en operación	Diseño	
<b>T</b>	98,5	123,5	°C
<b>P<sub>cabezas</sub></b>	101,3	0	kPa
<b>P<sub>colas</sub></b>	227,8	139,1	kPa

Como material de diseño se selecciona acero al carbono, ya que proporciona una resistencia adecuada a la corrosión con los compuestos presentes en la columna. El esfuerzo máximo permisible se ha obtenido de [1] y se presenta en la tabla 79.

Tabla 79 - Esfuerzo máximo permisible a la temperatura de diseño

	<b>T<sub>diseño</sub></b>	
<b>f</b>	120	N/mm <sup>2</sup>

En la tabla 80 se muestra el valor obtenido para el espesor requerido en cabezas, donde dado que la presión de operación es atmosférica, se toma el espesor mínimo para un recipiente cilíndrico de entre 1 y 2 m de diámetro que se indica en la tabla 5, de 7 mm. Se obtiene la longitud de la columna, obtenida con el número de platos reales y la separación escogida en el diseño hidráulico:

Tabla 80 - Dimensiones de la columna

<b>D<sub>i</sub></b>	1,43	m
<b>H<sub>c</sub></b>	31,5	m

## Anexo II: Cálculos Justificativos

La longitud se divide en secciones de 8 metros de longitud, lo que proporciona aproximadamente 4 secciones. Se incrementa el espesor en 2 mm por sección, obteniendo el perfil mostrado en la tabla 81.

**Tabla 81 - Espesor de las secciones**

<b>Espesor</b>		
<b>Sección 1</b>	7	mm
<b>Sección 2</b>	9	mm
<b>Sección 3</b>	11	mm
<b>Sección 4</b>	13	mm

A continuación se determinan los esfuerzos que debe soportar la base de la columna, comenzando por el peso. La carga por peso total se muestra en la tabla 82, y es la suma del peso de la carcasa y equipamiento auxiliar,  $W_v$ , determinado a través de la ecuación 70, el peso de los platos, ecuación 71, y el peso del aislante, mostrado en la tabla 83. El aislante seleccionado será lana mineral, con un espesor de 70 mm. Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 82 - Cargas por peso debidas a la carcasa y los platos**

<b><math>D_m</math></b>	1,46	m
<b><math>W</math></b>	131,3	kN
<b><math>W_{\text{plato}}</math></b>	1,91	kN
<b><math>W_{\text{platos}}</math></b>	133,5	kN

**Tabla 83 - Carga por peso debida al aislante**

<b>Aislante</b>	lana mineral	
<b><math>\rho_{\text{aislante}}</math></b>	130	$\text{kg/m}^3$
<b><math>t_{\text{aislante}}</math></b>	70	mm
<b><math>W_{\text{aislante}}</math></b>	6588,0	N
<b><math>W*2</math></b>	13,2	kN

Con estos datos se puede aplicar la ecuación 69 para determinar el esfuerzo debido al peso, que se muestra en la tabla 84.

**Tabla 84 - Esfuerzo debido al peso**

<b><math>W_{\text{total}}</math></b>	278,0	kN
<b><math>\sigma_w</math></b>	6,1	$\text{N/mm}^2$

## Anexo II: Cálculos Justificativos

En la tabla 85 se muestra el momento flector que soporta la base de la columna, principalmente debido a la carga impuesta por el viento. Para ello se determina el diámetro eficaz mediante la ecuación 75, y con él se estima la carga por metro lineal, ecuación 76, que se usa para calcular el momento con la ecuación 77:

**Tabla 85 - Momento flector debido al viento**

<b><math>D_{eff}</math></b>	1,59	m
<b><math>F_w</math></b>	2035,8	N/m
<b><math>M</math></b>	1,01E+06	Nm

Se calcula el segundo momento de área con la ecuación 74, y finalmente se determina el esfuerzo con la ecuación 75. Los resultados se indican en la tabla 86.

**Tabla 86 - Esfuerzo debido al momento flector**

<b><math>D_i</math></b>	1,43	m
<b><math>D_o</math></b>	1,46	m
<b><math>I_v</math></b>	1,54E-02	m <sup>4</sup>
<b><math>\sigma_b</math></b>	4,79E+07	N/m <sup>2</sup>
	47,9	N/mm <sup>2</sup>

En la tabla 87 se muestra los esfuerzos debidos a la presión en el fondo de la columna, calculados con la presión de diseño indicada en la tabla 75 y las ecuaciones 67 y 68:

**Tabla 87 - Esfuerzos debidos a la presión en colas**

<b><math>\sigma_h</math></b>	7,7	N/mm <sup>2</sup>
<b><math>\sigma_l</math></b>	3,8	N/mm <sup>2</sup>

Determinados todos los esfuerzos significativos, se calculan los esfuerzos longitudinal y circunferencial totales, donde el esfuerzo circunferencial se calcula para ambos lados de la columna con respecto al viento. Se calcula posteriormente el esfuerzo máximo, con la ecuación 83, que resulta muy inferior al esfuerzo máximo admisible. Los resultados se muestran en la tabla 88.

**Tabla 88 - Esfuerzos longitudinales y circunferenciales**

<b><math>\sigma_z</math> (cara viento)</b>	45,6	N/mm <sup>2</sup>
<b><math>\sigma_z</math> (contra viento)</b>	-50,2	N/mm <sup>2</sup>
<b><math>\sigma_h</math></b>	7,7	N/mm <sup>2</sup>
<b><math>\sigma_{max}</math></b>	57,9	N/mm <sup>2</sup>

## Anexo II: Cálculos Justificativos

En la tabla 89 se comprueba el esfuerzo crítico para el fallo por pandeo, calculado mediante la ecuación 84, y comparado con el esfuerzo máximo compresivo, suma del esfuerzo debido al peso, y el debido al momento flector generado por el viento.

**Tabla 89 - Comprobación de la estabilidad elástica**

$\sigma_c$	178,52	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\max \text{ comp}}$	54,0	N/mm <sup>2</sup>

Por último, se realiza el diseño mecánico para el soporte de tipo falda. Se va a utilizar una falda cilíndrica, con una altura de 3 m, suficiente para introducir las conexiones al fondo de la columna. El material de diseño es acero al carbono, y las propiedades se estiman a temperatura ambiente. El espesor supuesto va a ser el mismo que el de la carcasa de la columna en su última sección. Las características se recogen en la tabla 90.

**Tabla 90 - Propiedades y dimensiones de la falda**

$f_{\text{falda}}$	135	N/mm <sup>2</sup>
$\theta_{\text{falda}}$	90	°
$E_{\text{falda}}$	2,00E+05	Nm
$l_{\text{falda}}$	3	m
$D_{\text{falda}}$	1,43	m
$t_{\text{falda}}$	13	mm

Las cargas que soporta la falda se calculan en operación: peso del recipiente y momento flector debido al viento, y en el test hidráulico: las anteriores más el peso del recipiente lleno de agua, como se muestra en la tabla 91.

**Tabla 91 - Cargas que soporta la falda**

$W_{\text{recipiente}}$	278,0	kN
$W_{\text{agua}}$	496,61	kN
$M_s$	1,21E+06	Nm

Con las cargas se calculan el esfuerzo flector y el compresivo, mediante las ecuaciones 87 y 88. Los resultados se muestran en la tabla 92.

**Tabla 92 - Esfuerzos soportados por la falda**

$\sigma_{ws \text{ (test)}}$	13,14	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ws \text{ (operacion)}}$	4,72	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{bs}$	45,14	N/mm <sup>2</sup>

## Anexo II: Cálculos Justificativos

A partir de ellos se calculan los esfuerzos máximos de compresión y tensión a partir de las ecuaciones 85 y 86. El esfuerzo máximo de compresión se calcula en condiciones de test, y el máximo en tensión en operación, para que proporcionen los valores máximos.

Los valores máximos tolerables se calculan mediante las ecuaciones 89 y 90, y se comparan en la tabla 93 con los valores calculados.

**Tabla 93 - Esfuerzo máximos calculados y admisibles**

$\sigma_s$ (tensión)	40,42	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_s$ (compresión)	58,28	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_s$ (admisible tensión)	114,75	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_s$ (admisible compresión)	227,20	N/mm <sup>2</sup>

Se obtiene un amplio margen entre los valores obtenidos y los máximos admisibles, por lo que se da por finalizado el diseño.

## **Bibliografía**

1. **SINNOTT, R.K.** *Chemical Engineering Design*. 4th ed. Oxford : Elsevier-Butterworth-Heinneman, 2005.
2. **J.M Smith, H.C Van Ness, M.M. Abbott.** *Introducción a la termodinámica en la Ingeniería Química*. 7ª ed. México D.F. : McGraw-Hill Interamericana, 2007.
3. **OHE, Shuzo.** *Vapor-Liquid Equilibrium Data*. Amsterdam : Elsevier, 1989.

Planta de producción de Butan-2-ona

## Anexo III

Viabilidad económica

## Índice

1.	Introducción .....	4
2.	Capital total .....	4
3.	Costes de operación .....	4
3.1.	Costes fijos .....	5
3.1.1.	Costes de mantenimiento .....	5
3.1.2.	Costes de mano de obra.....	5
3.1.3.	Costes de supervisión.....	6
3.1.4.	Costes de laboratorio .....	6
3.1.5.	Otros costes de planta .....	6
3.1.6.	Seguros .....	7
3.1.7.	Impuestos.....	7
3.1.8.	<i>Royalties</i> y licencias.....	7
3.1.9.	Costes fijos totales .....	7
3.2.	Costes variables.....	8
3.2.1.	Costes de materias primas .....	8
3.2.2.	Suministros de la planta .....	8
3.2.3.	Utilidades.....	8
3.2.4.	Costes variables de operación totales.....	9
3.3.	Costes de operación directos .....	9
3.4.	Costes adicionales .....	9
3.5.	Costes totales de operación .....	9
4.	Ingresos .....	10
5.	Cálculo de los flujos de caja .....	10
5.1.	Préstamo .....	10
5.2.	Beneficios antes de impuestos.....	11
5.3.	Amortización .....	11
5.4.	Impuestos.....	11

## Anexo III: Viabilidad Económica

5.5. Flujos de caja .....	12
6. Análisis de rentabilidad .....	14
6.1. Valor actualizado neto .....	14
6.2. Tasa interna de retorno.....	15
6.3. Plazo de retorno .....	15
7. Análisis de sensibilidad.....	16
Bibliografía .....	17

## 1. Introducción

En el presente anexo se va a realizar la determinación de la viabilidad económica de la planta, para lo que será necesario determinar los costes de operación y los ingresos por ventas, teniendo en cuenta además la inversión inicial para la construcción de la planta. La viabilidad económica se estudia a través de tres factores:

- VAN, o valor actual neto.
- TIR, o tasa interna de retorno.
- Tiempo de retorno de la inversión.

Adicionalmente, se realizará un análisis de sensibilidad sencillo, estudiando la variación de los tres factores mencionados en función de las fluctuaciones del precio de venta del producto.

## 2. Capital total

Incluye los costes fijos y el capital circulante, calculados en el Anexo 4 (Presupuesto). Los valores se indican en la tabla 1.

Tabla 1 - Costes fijos y capital circulante

Capital total	Importe (€)
Costes fijos o inmovilizado	5.892.904,95
Capital Circulante	691.287,75

## 3. Costes de operación

Los costes de operación requeridos para mantener la producción en la planta se pueden dividir en dos grupos [1]:

- **Costes fijos:** Son aquellos independientes del volumen de producción, incluyendo los costes de mantenimiento, salarios de los operarios y supervisores, costes de laboratorio, gastos generales, intereses de capital, seguros, impuestos y costes de licencias.
- **Costes variables:** Son los costes dependientes del volumen de producción, incluyendo las materias primas, costes de material, utilidades y costes de embalaje y envíos.

### 3.1. Costes fijos

#### 3.1.1. Costes de mantenimiento

Los costes de mantenimiento incluyen la mano de obra, los materiales (incluyendo repuestos para el equipamiento). Según la fuente [1] los costes de mantenimiento pueden estimarse como un 5-10% de los costes del capital instalado (costes de inmovilizado, tabla 1). Se va a estimar el coste inicial como el 10%, y el resultado se indica en la tabla 2.

Tabla 2 - Costes de mantenimiento

	Importe (€)
Costes de mantenimiento	589.290,50

#### 3.1.2. Costes de mano de obra

Para estimar el número de operadores se utiliza la correlación de Alkhayat y Gerrard [2], que para un proceso de transformación química toma la forma expuesta en la ecuación 1.

$$N_{OL} = (6,29 + 0,23 * N_p)^{0,5} \quad (1)$$

Dónde:

- $N_{OL}$  es el número de operarios requerido por turno.
- $N_p$  es el número de equipos.

Para el caso de la planta, se consideran 12 equipos, obteniendo unos requerimientos de 3 operarios por turno, que corresponde al número de operarios que deben estar presentes en la planta al mismo tiempo.

Para el cálculo final de la plantilla a contratar, se utiliza el método expuesto por la fuente [2], en el que se considera que un operario trabaja 49 semanas al año, en semanas de 5 turnos (245 turnos/año por operario). Los requerimientos de turnos anuales se calculan como el producto de 365 días (operación + paradas) por 3 turnos al día, resultando en 1095 turnos/año. Dividiendo esta cantidad entre los turnos que realiza cada operario al año, se determinan unos requerimientos de 4,5 operarios requeridos por cada operario a contratar por cada operario que debe estar presente en la planta.

La plantilla total a contratar es por tanto de 13 operarios, con un salario aproximado de 24.000 €/año. El importe total se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3 - Costes de mano de obra**

	<b>Importe (€)</b>
Costes de mano de obra	312.000

### **3.1.3. Costes de supervisión**

Son los asociados al personal responsable de la supervisión de la planta. Según la fuente [1] se necesitan un supervisor por cada 4 o 5 operarios, por lo que teniendo en cuenta la plantilla contratada de 13 operarios, se van a contratar un total de 4 supervisores, con un salario aproximado de 40.000 €/año. Los costes totales se indican en la tabla 4.

**Tabla 4 - Costes de supervisión**

	<b>Importe (€)</b>
Costes de supervisión	160.000

### **3.1.4. Costes de laboratorio**

Incluyen los costes requeridos para la operación del laboratorio en que se realizan las tareas de análisis y seguimiento de la calidad de las materias primas y el producto. Según la fuente [1] se pueden estimar como un 20-30% del coste de mano de obra. El importe total se indica en la tabla 5.

**Tabla 5 - Costes de laboratorio**

	<b>Importe (€)</b>
Costes de laboratorio	62.400

### **3.1.5. Otros costes de planta**

Incluye todos los costes generales asociados con la operación de la planta que no aparezcan indicados en el resto de apartados, como la seguridad de la planta, personal de administración, gastos en materiales auxiliares etc. Se estiman como un 50-100 % del coste de mano de obra [1]. El valor final se indica en la tabla 6.

**Tabla 6 – Otros costes de planta**

	<b>Importe (€)</b>
Costes adicionales	234.000

### 3.1.6. Seguros

Incluye el coste del seguro de la planta y la parcela sobre la que se encuentra. Se puede estimar como un 1 o 2% del capital fijo [1]. El valor calculado se indica en la tabla 7.

Tabla 7 - Costes del seguro

	Importe (€)
Seguros	117.858,10

### 3.1.7. Impuestos

Incluye los impuestos calculados a partir del valor de la instalación. Se estiman como un 1 o 2% del capital fijo [1]. El valor calculado se indica en la tabla 8.

Tabla 8 - Valor de los impuestos

	Importe (€)
Impuestos	117.858,10

### 3.1.8. Royalties y licencias

Incluye los costes a pagar por el uso de tecnologías específicas en el proceso, se puede estimar como un 1-5% del capital fijo. El valor calculado se indica en la tabla 9.

Tabla 9 – Costes de licencias

	Importe (€)
Royalties y licencias	58.929,05

### 3.1.9. Costes fijos totales

El total de todas las partidas anteriores constituye el total de los costes fijos anuales, que se presenta en la tabla 10.

Tabla 10 – Costes fijos de producción

	Importe (€)
Costes fijos de producción	1.534.477,64

### 3.2. Costes variables

#### 3.2.1. Costes de materias primas

La única materia prima requerida para la producción de butan-2-ona es el butan-2-ol que se deshidrogena catalíticamente. El precio se obtiene de la fuente [3], y corresponde a unos 1000 euros/tonelada. Los requerimientos de 2-butanos son de 21.694,15 t/año. El coste total se indica en la tabla 11.

Tabla 11 – Costes de materia prima

	Importe (€)
Butan-2-ol	21.694.147,2

#### 3.2.2. Suministros de la planta

Incluye el coste de los materiales requeridos para la operación de la planta pero que no se incluyen dentro de las materias primas o los materiales de mantenimiento, como la ropa y equipos de protección individual de los trabajadores, los suministros de limpieza y otros. Se pueden calcular como un 10% del coste de mantenimiento calculado en los costes fijos de operación. El resultado se indica en la tabla 12.

Tabla 12 – Costes de los suministros auxiliares

	Importe (€)
Suministros	58.929,05

#### 3.2.3. Utilidades

Se realiza una estimación preliminar de los costes de utilidades (vapor, agua de refrigeración, electricidad, aceite térmico, gases inertes etc.), como un 5% de los costes variables totales. El valor calculado se indica en la tabla 13.

Tabla 13 – Costes de las utilidades

	Importe (€)
Utilidades	1.144.898,75

### 3.2.4. Costes variables de operación totales

La suma de los tres apartados anteriores proporciona los costes variables totales de operación, que se indican en la tabla 14.

Tabla 14 – Costes variables totales

	Importe (€)
Costes variables	22.897.975,00

### 3.3. Costes de operación directos

La suma de los costes variables y fijos de operación proporciona el total anual directo de costes de operación, que se indica en la tabla 15.

Tabla 15 – Costes de operación directos totales

	Importe (€)
Costes de operación directos	24.373.523,60

### 3.4. Costes adicionales

Incluye otros gastos en los que incurre la compañía, como gastos en ventas, costes operativos generales y gastos en investigación y desarrollo. Se pueden estimar como un 20-30% de los costes directos de operación. El valor calculado se indica en la tabla 16.

Tabla 16 – Costes adicionales de operación

	Importe (€)
Costes de adicionales	6.869.392,50

### 3.5. Costes totales de operación

Se calculan como la suma de los costes directos más los costes adicionales. El resultado se muestra en la tabla 17.

Tabla 17 – Costes de operación totales

	Importe (€)
Costes de operación	31.242.916,09

#### 4. Ingresos

Los ingresos responden a la venta del producto principal (butan-2-ona) y del hidrógeno como subproducto. La producción de butan-2-ona es de 20578,3 t/año, y la de hidrógeno es de 575,4 t/año. El precio de la butan-2-ona se estima en el entorno de los 1550 €/tonelada, valor proporcionado por la fuente [4], mientras que el precio del hidrógeno ronda el 0,5 \$/100 SFC [5] (pie cúbico estándar), que equivale a unos 0,16 €/Nm<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta la densidad del hidrógeno, de aproximadamente 0,09 kg/m<sup>3</sup> supone un precio de venta de unos 1700 €/t.

El valor de los ingresos totales anuales se indica en la tabla 18.

Tabla 18 - Ingresos por ventas

	Importe (€)
Butan-2-ona	31.896.362,52
Hidrógeno	978.146,00

#### 5. Cálculo de los flujos de caja

Para calcular los flujos de caja con los que se determinarán los parámetros de análisis económico.

##### 5.1. Préstamo

Para afrontar la inversión inicial se solicita un préstamo, generalmente se puede considerar que solicita por un importe de 2/3 del capital total presupuestado, calculado en el Anexo IV. El tipo de interés típico se moverá en el entorno del 6-8 %.

Las cuotas a pagar en cada uno de los años se calculan según el método francés, o de cuotas constantes, mediante la ecuación 2.

$$\alpha_k = \frac{C_0}{\sum_{z=1}^n (1+i)^{-z}} \quad (2)$$

Dónde:

- $\alpha_k$  , es el cuota.
- $C_0$  es el importe total del préstamo.
- $z$  es el año en el que se calcula la cuota.
- $n$  es el número total de años.
-

El capital adeuda para un año concreto se puede calcular según la ecuación 3.

$$C_k = \sum_{z=k+1}^n \alpha_k * (1 + i)^{(k-z)} \quad (3)$$

Dónde los términos son análogos a los de la ecuación 2.

### 5.2. Beneficios antes de impuestos

Los beneficios antes de impuestos representan la base sobre la que se computan los impuestos, y se pueden calcular según la ecuación 4.

$$BAT_k = IT_k - CT_k - A_k - I_k \quad (4)$$

Dónde:

- $BAT_k$  son los beneficios antes de impuestos.
- $IT_k$  son los ingresos totales.
- $CT_k$  son los costes totales de operación.
- $A_k$  es la cuota de amortización.
- $I_k$  son los intereses del préstamo.

### 5.3. Amortización

La amortización se considera constante a lo largo del período de vida útil de la planta, considerando el capital total presupuestado para la duración de la vida de la planta, según la ecuación 5.

$$A = \frac{C}{n} \quad (5)$$

Dónde:

- A es la cuota de amortización.
- C es el capital total de la planta (inmovilizado).
- n es la vida útil de la planta.

### 5.4. Impuestos

Los impuestos se calculan sobre la base del beneficio antes de impuestos, como un porcentaje del 30%, como se indica en la ecuación 6.

$$Impuestos_k = 0,3 * BAT_k \quad (6)$$

### 5.5. Flujos de caja

El cálculo de los flujos de caja se refleja de forma esquemática en la tabla 19.

Tabla 19 - Cálculo del flujo de caja para un año genérico

Año
(+ Ingresos por ventas
(-) Costes totales
(-) Intereses de la deuda
(-) Amortización
<b>Beneficio antes de impuestos (BAT )</b>
(-) Impuestos
<b>Beneficio neto (BN)</b>
(+ Amortización
<b>Flujo de caja</b>

Adicionalmente, se considera una tasa de inflación anual del 3%, que se aplicará tanto sobre los ingresos por ventas como por los costes totales.

Para calcular los flujos de caja, se va a suponer que se financia con un crédito 2/3 del capital total presupuestado, a un 6% de interés durante un plazo de 15 años. Los resultados por año se muestran en las tablas de este apartado. En el año 0 se muestra la inversión total, sobre la que se calcula el importe a financiar con el crédito (2/3 del total), de 4.389.461,80 €.

Año	0	1
(+ Ingresos por ventas	-	32.874.508,52 €
(-) Costes operación	-	31.242.916,09 €
(-) Amortización	-	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>		929.278,54 €
(-) Impuestos	-	278.783,56 €
<b>Beneficio neto</b>	-	650.494,98 €
(+ Amortización	-	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	-6.584.192,71 €	1.089.441,16 €
<b>Flujo acumulado</b>	-6.584.192,71 €	-5.494.751,55 €

Año	2	3
(+ Ingresos por ventas	33.860.743,78 €	34.876.566,09 €
(-) Costes operación	32.180.203,58 €	33.145.609,68 €
(-) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>	989.541,32 €	1.051.951,43 €
(-) Impuestos	296.862,39 €	315.585,43 €
<b>Beneficio neto</b>	692.678,92 €	736.366,00 €
(+ Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	1.131.625,10 €	1.175.312,18 €
<b>Flujo acumulado</b>	-4.363.126,45 €	-3.187.814,27 €

Año	4	5
(+) Ingresos por ventas	35.922.863,07 €	37.000.548,96 €
(-) Costes operación	34.139.977,97 €	35.164.177,31 €
(-) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>	<b>1.116.593,66 €</b>	<b>1.183.556,56 €</b>
(-) Impuestos	334.978,10 €	355.066,97 €
<b>Beneficio neto</b>	<b>781.615,56 €</b>	<b>828.489,59 €</b>
(+) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>1.220.561,74 €</b>	<b>1.267.435,77 €</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>-1.967.252,53 €</b>	<b>-699.816,75 €</b>

Año	6	7
(+) Ingresos por ventas	38.110.565,43 €	39.253.882,40 €
(-) Costes operación	36.219.102,63 €	37.305.675,71 €
(-) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>	<b>1.252.932,64 €</b>	<b>1.324.818,56 €</b>
(-) Impuestos	375.879,79 €	397.445,57 €
<b>Beneficio neto</b>	<b>877.052,85 €</b>	<b>927.372,99 €</b>
(+) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>1.315.999,03 €</b>	<b>1.366.319,17 €</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>616.182,28 €</b>	<b>1.982.501,45 €</b>

Año	8	9
(+) Ingresos por ventas	40.431.498,87 €	41.644.443,83 €
(-) Costes operación	38.424.845,98 €	39.577.591,36 €
(-) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>	<b>1.399.315,31 €</b>	<b>1.476.528,48 €</b>
(-) Impuestos	419.794,59 €	442.958,54 €
<b>Beneficio neto</b>	<b>979.520,72 €</b>	<b>1.033.569,93 €</b>
(+) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>1.418.466,90 €</b>	<b>1.472.516,12 €</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>3.400.968,34 €</b>	<b>4.873.484,46 €</b>

Año	10	11
(+) Ingresos por ventas	42.893.777,15 €	44.180.590,46 €
(-) Costes operación	40.764.919,10 €	41.987.866,68 €
(-) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>	<b>1.556.568,45 €</b>	<b>1.639.550,65 €</b>
(-) Impuestos	466.970,54 €	491.865,20 €
<b>Beneficio neto</b>	<b>1.089.597,92 €</b>	<b>1.147.685,46 €</b>
(+) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>1.528.544,10 €</b>	<b>1.586.631,64 €</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>6.402.028,56 €</b>	<b>7.988.660,19 €</b>

Año	12	13
(+) Ingresos por ventas	45.506.008,18 €	46.871.188,42 €
(-) Costes operación	43.247.502,68 €	44.544.927,76 €
(-) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>	<b>1.725.595,82 €</b>	<b>1.814.830,24 €</b>
(-) Impuestos	517.678,75 €	544.449,07 €
<b>Beneficio neto</b>	<b>1.207.917,07 €</b>	<b>1.270.381,17 €</b>
(+) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>1.646.863,25 €</b>	<b>1.709.327,35 €</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>9.635.523,45 €</b>	<b>11.344.850,80 €</b>

Año	14	15
(+) Ingresos por ventas	48.277.324,07 €	49.725.643,80 €
(-) Costes operación	45.881.275,59 €	47.257.713,86 €
(-) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Beneficio antes de impuestos</b>	<b>1.907.386,07 €</b>	<b>2.003.401,62 €</b>
(-) Impuestos	572.215,82 €	601.020,49 €
<b>Beneficio neto</b>	<b>1.335.170,25 €</b>	<b>1.402.381,13 €</b>
(+) Amortización	438.946,18 €	438.946,18 €
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>1.774.116,43 €</b>	<b>1.841.327,31 €</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>13.118.967,23 €</b>	<b>14.960.294,54 €</b>

## 6. Análisis de rentabilidad

### 6.1. Valor actualizado neto

El valor actualizado neto o VAN es una herramienta de análisis económico que permite determinar el valor de los flujos de caja acumulados en el futuro por una inversión en el presente. Se puede calcular como la suma de los flujos de caja actualizados a su valor actual menos la inversión inicial, según la ecuación 7.

$$VAN = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{(1 + i')^k} \quad (7)$$

Dónde:

- $I_0$  es la inversión inicial.
- $R_k$  es el flujo de caja en el año k.
- $i'$  es la tasa de actualización o coste de oportunidad.
- n es el número de años sobre los que se evalúa la inversión.

Se toma un valor de la tasa de actualización del 7%, y se obtiene un VAN de 5.897.687,33 €, por lo que se puede considerar rentable, generando beneficio sobre el coste de oportunidad.

### 6.2. Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno o TIR se corresponde con la tasa de actualización con la que el valor actualizado neto se iguala a 0, según la ecuación 8.

$$0 = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{(1 + TIR)^k} \quad (8)$$

Dónde los términos son análogos a los de la ecuación 8, pero se substituye la tasa de actualización por el TIR. Para que el proyecto sea rentable, la tasa interna de retorno debe ser mayor que la tasa de actualización, de forma que la inversión en el proyecto genere un mayor retorno de la inversión que el coste de oportunidad base.

Para el proyecto, la tasa interna de retorno obtenida es del 18%, superior al coste de oportunidad, por lo que la inversión se considera rentable.

### 6.3. Plazo de retorno

Como último parámetro de evaluación de la rentabilidad se estudia el plazo de retorno o *Payback*, que se corresponde con el plazo en el que los flujos de caja acumulados alcanzan el valor de la inversión inicial. Se representan los flujos de caja acumulados en la figura 1.

El plazo de retorno obtenido es de aproximadamente 5 años y 6 meses, adecuado para el tipo de inversión.

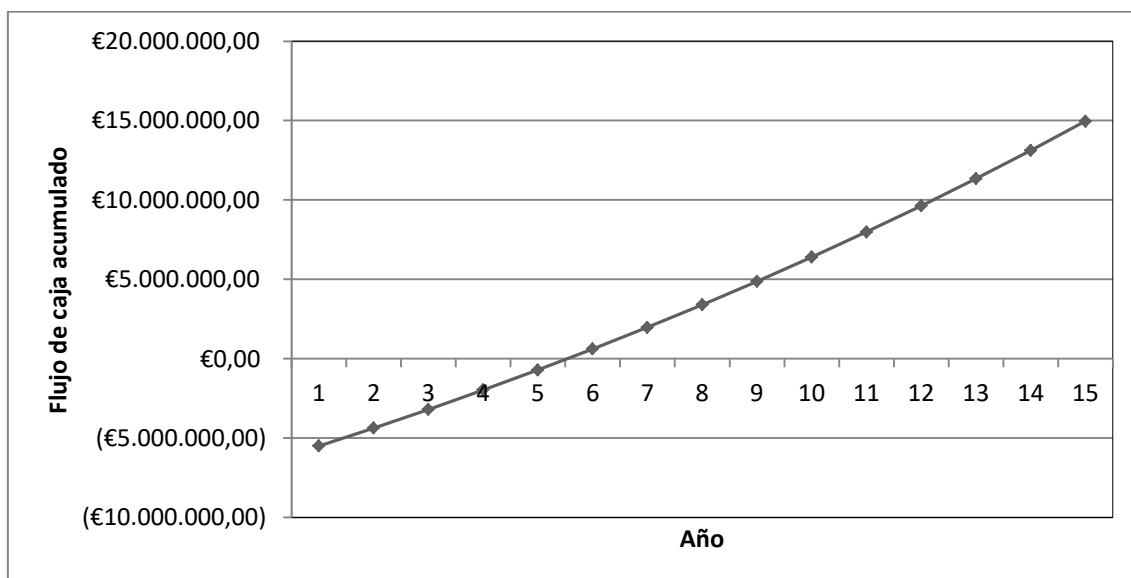


Figura 1- Flujos de caja acumulados / Payback

## **7. Análisis de sensibilidad**

Se realiza un breve análisis de sensibilidad a la rentabilidad de la inversión como función de la variación del precio del producto principal (butan-2-ona). Para ello, se va a estudiar la variación de la rentabilidad de la inversión cuando el precio varía en un +/- 10%.

Para un descenso del 10% en el precio de la butan-2-ona, el proyecto deja de ser rentable y alcanza y la planta comienza a perder dinero, con lo que no se recupera la inversión inicial. Sin embargo, cabe destacar que el mercado de la butan-2-ona tiene una buena proyección futura, y se espera que los precios continúen al alza, como se detalla en el estudio de mercado presentado en el documento de la memoria. En este contexto, para un aumento del 10% en el precio de la butan-2-ona, el VAN alcanza los 30.196.706,12 €, con una tasa de retorno del 54%.

Se puede concluir que la rentabilidad del proceso presenta una gran sensibilidad frente a las variaciones en el precio del producto, pero que la situación favorable del mercado permitirá mantener o incluso mejorar la rentabilidad calculada para los precios actuales.

## Bibliografía

1. **SINNOTT, R.K.** *Chemical Engineering Design*. 4th ed. Oxford : Elsevier-Butterworth-Heinemann, 2005.
2. **TURTON, Richard.** *Analysis, Synthesis, And Design Of Chemical Processes*. 4ª Ed. New Jersey : Pearson Education, 2012.
3. **ICIS.** *ICIS Pricing: Oxo-Alcohols, Europe*. 2014.
4. **ICIS.** Global Chemical Profile: MEK. [En línea] 21 de Marzo de 2011. [Citado el: 6 de Julio de 2017.] <https://www.icis.com/resources/news/2011/03/21/9445352/global-chemical-profile-mek/>.
5. **ICIS.** Chemical Profile Hydrogen. [En línea] 8 de Diciembre de 2005. [Citado el: 6 de Julio de 2017.] <https://www.icis.com/resources/news/2005/12/08/190713/chemical-profile-hydrogen/>.

Planta de producción de Butan-2-ona

## Anexo IV

Fichas de Seguridad Química



## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 453/2010

Versión 5.3 Fecha de revisión 03.12.2015

Fecha de impresión 20.03.2017

**SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa****1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : 2-Butanona

Referencia : 443468

Marca : Sigma-Aldrich

No. Índice : 606-002-00-3

REACH No. : Un número de registro no está disponible para esta sustancia, ya que la sustancia o sus usos están exentos del registro, el tonelaje anual no requiere registro o dicho registro está previsto para una fecha posterior

No. CAS : 78-93-3

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

Compañía : Sigma-Aldrich Quimica, S.L.  
Ronda de Poniente, 3  
Apto. Correos 278  
E-28760 TRES CANTOS -MADRID

Teléfono : +34 91 6619977

Fax : +34 91 6619642

E-mail de contacto : eurtechserv@sial.com

**1.4 Teléfono de emergencia**

Teléfono de Urgencia 900-868538 (CHEMTREC España)  
+(34)-931768545 (CHEMTREC internacional)

**SECCIÓN 2: Identificación de los peligros****2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla****Clasificación de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008**

Líquidos inflamables (Categoría 2), H225

Irritación ocular (Categoría 2), H319

Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (Categoría 3), Sistema nervioso central, H336

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

**2.2 Elementos de la etiqueta****Etiquetado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008**

Pictograma



Palabra de advertencia Peligro

Indicación(es) de peligro

H225

H319

Líquido y vapores muy inflamables.

Provoca irritación ocular grave.

H336	Puede provocar somnolencia o vértigo.
Declaración(es) de prudencia P210	Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.
P305 + P351 + P338	EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
P370 + P378 P403 + P235	En caso de incendio: Utilizar polvo seco o arena seca para la extinción. Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener en lugar fresco.
Información suplementaria sobre riesgos (UE) EUH066	La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel.

### 2.3 Otros Peligros

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (vPvB) a niveles del 0,1% o superiores.

---

## SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

### 3.1 Sustancias

Sinónimos : Methyl ethyl ketone  
MEK  
Ethyl methyl ketone

Formula : C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O  
Peso molecular : 72,11 g/mol  
No. CAS : 78-93-3  
No. CE : 201-159-0  
No. Indice : 606-002-00-3

#### Ingredientes peligrosos de acuerdo con el Reglamento (CE) Nº 1272/2008

Componente	Clasificación	Concentración
<b>Ethyl methyl ketone</b>		
No. CAS	78-93-3	Flam. Liq. 2; Eye Irrit. 2; STOT SE 3; H225, H319, H336  <= 100 %
No. CE	201-159-0	
No. Indice	606-002-00-3	

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

---

## SECCIÓN 4: Primeros auxilios

### 4.1 Descripción de los primeros auxilios

#### Recomendaciones generales

Consultar a un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

#### Si es inhalado

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si ha parado de respirar, hacer la respiración artificial. Consultar a un médico.

#### En caso de contacto con la piel

Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar a un médico.

#### En caso de contacto con los ojos

Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos y consulte al médico.

#### Si es tragado

No provocar el vómito. Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar a un médico.

#### **4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados**

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta (ver sección 2.2) y / o en la sección 11

#### **4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**

Sin datos disponibles

---

### **SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios**

#### **5.1 Medios de extinción**

##### **Medios de extinción apropiados**

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo seco o dióxido de carbono.

#### **5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla**

Óxidos de carbono

Es posible el retorno de la llama a distancia considerable., Los recipientes expuestos al fuego pueden explotar.

#### **5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios**

Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.

#### **5.4 Otros datos**

El agua pulverizada puede ser utilizada para enfriar los contenedores cerrados.

---

### **SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental**

#### **6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**

Utilícese equipo de protección individual. Evitar respirar los vapores, la neblina o el gas. Asegúrese una ventilación apropiada. Retirar todas las fuentes de ignición. Evacuar el personal a zonas seguras. Tener cuidado con los vapores que se acumulan formando así concentraciones explosivas. Los vapores pueden acumularse en las zonas inferiores.

Equipo de protección individual, ver sección 8.

#### **6.2 Precauciones relativas al medio ambiente**

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

#### **6.3 Métodos y material de contención y de limpieza**

Contener y recoger el derrame con un aspirador aislado de la electricidad o cepillándolo, y meterlo en un envase para su eliminación de acuerdo con las reglamentaciones locales (ver sección 13).

#### **6.4 Referencia a otras secciones**

Para eliminación de desechos ver sección 13.

---

### **SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento**

#### **7.1 Precauciones para una manipulación segura**

Evítese el contacto con los ojos y la piel. Evitar la inhalación de vapor o neblina.

Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - No fumar. Tomar medidas para impedir la acumulación de descargas electrostáticas.

Ver precauciones en la sección 2.2

#### **7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**

Almacenar en atmósfera inerte. Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Los contenedores que se abren deben volver a cerrar cuidadosamente y mantener en posición vertical para evitar pérdidas.

Higroscópico.

#### **7.3 Usos específicos finales**

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

## SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

### 8.1 Parámetros de control

#### Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

Componente	No. CAS	ValorForma de exposición	Parámetros de control	Base
Ethyl methyl ketone	78-93-3	STEL	300 ppm 900 mg/m <sup>3</sup>	Directiva 2000/39/CE de la Comisión por la que se establece una primera lista de valores límite de exposición profesional indicativos
	Observaciones	Indicativo		
		TWA	200 ppm 600 mg/m <sup>3</sup>	Directiva 2000/39/CE de la Comisión por la que se establece una primera lista de valores límite de exposición profesional indicativos
		Indicativo		
		VLA-ED	200 ppm 600 mg/m <sup>3</sup>	Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos - Tabla 1: Límites Ambientales de exposición profesional
		<p>Agente químico que tiene Valor Límite Biológico específico en este documento.</p> <p>Agente químico para el que la U.E. estableció en su día un valor límite indicativo. Todos estos agentes químicos figuran al menos en una de las directivas de valores límite indicativos publicadas hasta ahora (ver Anexo C. Bibliografía). Los estados miembros disponen de un tiempo fijado en dichas directivas para su transposición a los valores límites de cada país miembro. Una vez adoptados, estos valores tienen la misma validez que el resto de los valores adoptados por el país.</p>		
		VLA-EC	300 ppm 900 mg/m <sup>3</sup>	Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos - Tabla 1: Límites Ambientales de exposición profesional
		<p>Agente químico que tiene Valor Límite Biológico específico en este documento.</p> <p>Agente químico para el que la U.E. estableció en su día un valor límite indicativo. Todos estos agentes químicos figuran al menos en una de las directivas de valores límite indicativos publicadas hasta ahora (ver Anexo C. Bibliografía). Los estados miembros disponen de un tiempo fijado en dichas directivas para su transposición a los valores límites de cada país miembro. Una vez adoptados, estos valores tienen la misma validez que el resto de los valores adoptados por el país.</p>		

#### Límites biológicos de exposición profesional

Componente	No. CAS	Parámetros	Valor	Muestras biológicas	Base
Ethyl methyl ketone	78-93-3	metiletilcetona	2,0000 mg/l	Orina	Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos en España - Valores Límite Biológicos
	Observaciones	final de la jornada laboral			

## 8.2 Controles de la exposición

### Controles técnicos apropiados

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

### Protección personal

#### Protección de los ojos/ la cara

Caretas de protección y gafas de seguridad. Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).

#### Protección de la piel

Manipular con guantes. Los guantes deben ser inspeccionados antes de su uso. Utilice la técnica correcta de quitarse los guantes (sin tocar la superficie exterior del guante) para evitar el contacto de la piel con este producto. Deseche los guantes contaminados después de su uso, de conformidad con las leyes aplicables y buenas prácticas de laboratorio. Lavar y secar las manos.

Los guantes de protección seleccionados deben de cumplir con las especificaciones de la Directiva de la UE 89/686/CEE y de la norma EN 374 derivado de ello.

#### Salpicaduras

Material: goma butílica

espesura mínima de capa: 0,3 mm

tiempo de penetración: 292 min

Material probado: Butoject® (KCL 897 / Aldrich Z677647, Talla M)

origen de datos: KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Teléfono +49 (0)6659 87300, e-mail sales@kcl.de, Método de prueba: EN374

Si es utilizado en solución, o mezclado con otras sustancias, y bajo condiciones diferentes de la EN 374, ponerse en contacto con el proveedor de los guantes aprobados CE. Esta recomendación es meramente aconsejable y deberá ser evaluada por un responsable de seguridad e higiene industrial familiarizado con la situación específica de uso previsto por nuestros clientes. No debe interpretarse como una aprobación de oferta para cualquier escenario de uso específico.

#### Protección Corporal

Indumentaria impermeable, Vestimenta protectora antiestática retardante de la flama., El tipo de equipamiento de protección debe ser elegido según la concentración y la cantidad de sustancia peligrosa al lugar específico de trabajo.

#### Protección respiratoria

Donde el asesoramiento de riesgo muestre que los respiradores purificadores de aire son apropiados, usar un respirador que cubra toda la cara con combinación multi-proposito (EEUU) o tipo ABEK (EN 14387) respiradores de cartucho de respuesto para controles de ingeniería. Si el respirador es la única protección, usar un respirador suministrado que cubra toda la cara Usar respiradores y componenetes testados y aprobados bajo los estándares gubernamentales apropiados como NIOSH (EEUU) o CEN (UE)

#### Control de exposición ambiental

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

---

## SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

### 9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| a) Aspecto                | Forma: líquido, claro<br>Color: incoloro |
| b) Olor                   | Sin datos disponibles                    |
| c) Umbral olfativo        | Sin datos disponibles                    |
| d) pH                     | Sin datos disponibles                    |
| e) Punto de fusión/ punto | -87 °C                                   |

	de congelación	
f)	Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	80 °C - lit.
g)	Punto de inflamación	-3 °C - copa cerrada
h)	Tasa de evaporación	Sin datos disponibles
i)	Inflamabilidad (sólido, gas)	Sin datos disponibles
j)	Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos	Límites superior de explosividad: 10,1 %(V) Límites inferior de explosividad: 1,8 %(V)
k)	Presión de vapor	95 hPa a 20 °C
l)	Densidad de vapor	2,49 - (Aire = 1.0)
m)	Densidad relativa	Sin datos disponibles
n)	Solubilidad en agua	soluble
o)	Coefficiente de reparto n-octanol/agua	log Pow: 0,29
p)	Temperatura de auto-inflamación	Sin datos disponibles
q)	Temperatura de descomposición	Sin datos disponibles
r)	Viscosidad	Sin datos disponibles
s)	Propiedades explosivas	Sin datos disponibles
t)	Propiedades comburentes	Sin datos disponibles

## 9.2 Otra información de seguridad

Tensión superficial	24,6 mN/m a 20 °C
Densidad relativa del vapor	2,49 - (Aire = 1.0)

---

## SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

### 10.1 Reactividad

Sin datos disponibles

### 10.2 Estabilidad química

Estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.

### 10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

Sin datos disponibles

### 10.4 Condiciones que deben evitarse

Exposición a la humedad.

Calor, llamas y chispas. Temperaturas extremas y luz directa del sol.

### 10.5 Materiales incompatibles

Oxidantes, Agentes extremadamente reductores

### 10.6 Productos de descomposición peligrosos

Otros productos de descomposición peligrosos - Sin datos disponibles

En caso de incendio: véase sección 5

---

## SECCIÓN 11: Información toxicológica

### 11.1 Información sobre los efectos toxicológicos

#### Toxicidad aguda

DL50 Oral - Rata - 2.737 mg/kg

CL50 Inhalación - Ratón - 4 h - 32.000 mg/m<sup>3</sup>

CL50 Inhalación - Mamífero - 38.000 mg/m<sup>3</sup>

DL50 Cutáneo - Conejo - 6.480 mg/kg

#### Corrosión o irritación cutáneas

Piel - Conejo

Resultado: No irrita la piel

(Directrices de ensayo 404 del OECD)

#### Lesiones o irritación ocular graves

Ojos - Conejo

Resultado: Irrita los ojos.

(Directrices de ensayo 405 del OECD)

#### Sensibilización respiratoria o cutánea

Sin datos disponibles

#### Mutagenicidad en células germinales

Sin datos disponibles

#### Carcinogenicidad

IARC: No se identifica ningún componente de este producto, que presente niveles mayores que o igual a 0,1% como agente carcinógeno humano probable, posible o confirmado por la (IARC) Agencia Internacional de Investigaciones sobre Carcinógenos.

#### Toxicidad para la reproducción

Sin datos disponibles

#### Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

Puede provocar somnolencia o vértigo.

#### Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas

Sin datos disponibles

#### Peligro de aspiración

Sin datos disponibles

#### Información Adicional

RTECS: EL6475000

Depresión del sistema nervioso central, Trastornos gastrointestinales, narcosis

Hígado - Irregularidades - Con base en la evidencia humana

---

## SECCIÓN 12: Información ecológica

### 12.1 Toxicidad

Toxicidad para los peces mortalidad NOEC - Cyprinodon variegatus - 400 mg/l - 96 h

CL50 - Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda) - 3.130 - 3.320 mg/l - 96 h

Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos CL50 - Daphnia magna (Pulga de mar grande) - > 520 mg/l - 48 h

CE50 - Daphnia magna (Pulga de mar grande) - 7.060 mg/l - 24 h

**12.2 Persistencia y degradabilidad**

Sin datos disponibles

**12.3 Potencial de bioacumulación**

Sin datos disponibles

**12.4 Movilidad en el suelo**

Sin datos disponibles

**12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB**

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (vPvB) a niveles del 0,1% o superiores.

**12.6 Otros efectos adversos**

Sin datos disponibles

---

**SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación****13.1 Métodos para el tratamiento de residuos****Producto**

Quemar en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador, procediendo con gran cuidado en la ignición ya que este producto es extremadamente inflamable. Ofertar el sobrante y las soluciones no-aprovechables a una compañía de vertidos acreditada.

**Envases contaminados**

Eliminar como producto no usado.

---

**SECCIÓN 14: Información relativa al transporte****14.1 Número ONU**

ADR/RID: 1193

IMDG: 1193

IATA: 1193

**14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas**

ADR/RID: ETILMETILCETONA

IMDG: ETHYL METHYL KETONE

IATA: Ethyl methyl ketone

**14.3 Clase(s) de peligro para el transporte**

ADR/RID: 3

IMDG: 3

IATA: 3

**14.4 Grupo de embalaje**

ADR/RID: II

IMDG: II

IATA: II

**14.5 Peligros para el medio ambiente**

ADR/RID: no

IMDG Marine pollutant: no

IATA: no

**14.6 Precauciones particulares para los usuarios**

Sin datos disponibles

---

**SECCIÓN 15: Información reglamentaria**

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos de la Reglamento (CE) No. 453/2010.

**15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla****15.2 Evaluación de la seguridad química**

Para este producto no se ha llevado a cabo una evaluación de la seguridad química

---

**SECCIÓN 16: Otra información****Texto íntegro de las Declaraciones-H referidas en las secciones 2 y 3.**

EUH066

La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel.

H225 Líquido y vapores muy inflamables.  
H319 Provoca irritación ocular grave.  
H336 Puede provocar somnolencia o vértigo.

**Otros datos**

Copyright 2015 Sigma-Aldrich Co. LLC. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. La información contenida en este documento esta basada en el presente estado de nuestro conocimiento y es aplicable a las precauciones de seguridad apropiadas para el producto. No representa ninguna garantía de las propiedades del producto. La Corporación Sigma-Aldrich y sus Compañías Afiliadas, no responderán por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Dirijase a [www.sigma-aldrich.com](http://www.sigma-aldrich.com) y/o a los términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega.

---

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 453/2010

Versión 5.2 Fecha de revisión 27.07.2015

Fecha de impresión 20.03.2017

### SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

#### 1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : 2-Butanol

Referencia : W510254

Marca : Aldrich

No. Índice : 603-127-00-5

REACH No. : Un número de registro no está disponible para esta sustancia, ya que la sustancia o sus usos están exentos del registro, el tonelaje anual no requiere registro o dicho registro está previsto para una fecha posterior

No. CAS : 78-92-2

#### 1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

#### 1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Sigma-Aldrich Química, S.L.  
Ronda de Poniente, 3  
Apto. Correos 278  
E-28760 TRES CANTOS -MADRID

Teléfono : +34 91 6619977

Fax : +34 91 6619642

E-mail de contacto : eurtechserv@sial.com

#### 1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia 900-868538 (CHEMTREC España)  
+(34)-931768545 (CHEMTREC internacional)

### SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

#### 2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

##### Clasificación de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008

Líquidos inflamables (Categoría 3), H226

Irritación ocular (Categoría 2), H319

Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (Categoría 3), Sistema nervioso central, H336

Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (Categoría 3), Sistema respiratorio, H335

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

#### 2.2 Elementos de la etiqueta

##### Etiquetado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008

Pictograma



Palabra de advertencia

Atención

**Indicación(es) de peligro**

H226 Líquidos y vapores inflamables.  
 H319 Provoca irritación ocular grave.  
 H335 Puede irritar las vías respiratorias.  
 H336 Puede provocar somnolencia o vértigo.

**Declaración(es) de prudencia**

P210 Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.  
 P280 Llevar gafas/ máscara de protección.  
 P304 + P340 + P312 EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. Llamar a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o a un médico si la persona se encuentra mal.  
 P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.  
 P337 + P313 Si persiste la irritación ocular: Consultar a un médico.  
 P403 + P235 Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener en lugar fresco.

Declaración Suplementaria del Peligro ninguno(a)

**2.3 Otros Peligros**

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (vPvB) a niveles del 0,1% o superiores.

**SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes****3.1 Sustancias**

Sinónimos : sec-Butyl alcohol  
 (±)-2-Butanol

Formula : C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O

Peso molecular : 74,12 g/mol

No. CAS : 78-92-2

No. CE : 201-158-5

No. Indice : 603-127-00-5

**Ingredientes peligrosos de acuerdo con el Reglamento (CE) N° 1272/2008**

Componente	Clasificación	Concentración
<b>Butan-2-ol</b>		
No. CAS	78-92-2	Flam. Liq. 3; Eye Irrit. 2; STOT SE 3; H226, H319, H336, H335
No. CE	201-158-5	
No. Indice	603-127-00-5	
		<= 100 %

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

**SECCIÓN 4: Primeros auxilios****4.1 Descripción de los primeros auxilios****Recomendaciones generales**

Consultar a un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

**Si es inhalado**

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si ha parado de respirar, hacer la respiración artificial. Consultar a un médico.

**En caso de contacto con la piel**

Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar a un médico.

**En caso de contacto con los ojos**

Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos y consulte al médico.

**Si es tragado**

No provocar el vómito Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar a un médico.

**4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados**

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta (ver sección 2.2) y / o en la sección 11

**4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**

Sin datos disponibles

---

**SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios****5.1 Medios de extinción****Medios de extinción apropiados**

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo seco o dióxido de carbono.

**5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla**

Óxidos de carbono

**5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios**

Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.

**5.4 Otros datos**

El agua pulverizada puede ser utilizada para enfriar los contenedores cerrados.

---

**SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental****6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**

Utilícese equipo de protección individual. Evitar respirar los vapores, la neblina o el gas. Asegúrese una ventilación apropiada. Retirar todas las fuentes de ignición. Evacuar el personal a zonas seguras. Tener cuidado con los vapores que se acumulan formando así concentraciones explosivas. Los vapores pueden acumularse en las zonas inferiores.

Equipo de protección individual, ver sección 8.

**6.2 Precauciones relativas al medio ambiente**

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

**6.3 Métodos y material de contención y de limpieza**

Contener y recoger el derrame con un aspirador aislado de la electricidad o cepillándolo, y meterlo en un envase para su eliminación de acuerdo con las reglamentaciones locales (ver sección 13).

**6.4 Referencia a otras secciones**

Para eliminación de desechos ver sección 13.

---

**SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento****7.1 Precauciones para una manipulación segura**

Evítese el contacto con los ojos y la piel. Evitar la inhalación de vapor o neblina.

Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - No fumar. Tomar medidas para impedir la acumulación de descargas electrostáticas.

Ver precauciones en la sección 2.2

**7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**

Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Los contenedores que se abren deben volverse a cerrar cuidadosamente y mantener en posición vertical para evitar pérdidas.

Clase alemán de almacenamiento (TRGS 510): Líquidos inflamables

### 7.3 Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

## SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

### 8.1 Parámetros de control

#### Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

Componente	No. CAS	ValorForma de exposición	Parámetros de control	Base
Butan-2-ol	78-92-2	VLA-ED	100 ppm 308 mg/m <sup>3</sup>	Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos - Tabla 1: Límites Ambientales de exposición profesional

### 8.2 Controles de la exposición

#### Controles técnicos apropiados

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

#### Protección personal

##### Protección de los ojos/ la cara

Caretas de protección y gafas de seguridad. Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).

##### Protección de la piel

Manipular con guantes. Los guantes deben ser inspeccionados antes de su uso. Utilice la técnica correcta de quitarse los guantes (sin tocar la superficie exterior del guante) para evitar el contacto de la piel con este producto. Deseche los guantes contaminados después de su uso, de conformidad con las leyes aplicables y buenas prácticas de laboratorio. Lavar y secar las manos.

Los guantes de protección seleccionados deben de cumplir con las especificaciones de la Directiva de la UE 89/686/CEE y de la norma EN 374 derivado de ello.

##### Sumerción

Material: Caucho nitrilo

espesura minima de capa: 0,4 mm

tiempo de penetración: 480 min

Material probado:Camatril® (KCL 730 / Aldrich Z677442, Talla M)

##### Salpicaduras

Material: Caucho natural latex/cloropreno

espesura minima de capa: 0,6 mm

tiempo de penetración: 30 min

Material probado:Lapren® (KCL 706 / Aldrich Z677558, Talla M)

origen de datos: KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Teléfono +49 (0)6659 87300, e-mail

sales@kcl.de, Método de prueba: EN374

Si es utilizado en solución, o mezclado con otras sustancias, y bajo condiciones diferentes de la EN 374, ponerse en contacto con el proveedor de los guantes aprobados CE. Esta recomendación es meramente aconsejable y deberá ser evaluada por un responsable de seguridad e higiene industrial familiarizado con la situación específica de uso previsto por nuestros clientes. No debe interpretarse como una aprobación de oferta para cualquier escenario de uso específico.

##### Protección Corporal

indumentaria impermeable, Vestimenta protectora antiestática retardante de la flama., El tipo de equipamiento de protección debe ser elegido según la concentración y la cantidad de sustancia peligrosa al lugar específico de trabajo.

### Protección respiratoria

Donde el asesoramiento de riesgo muestre que los respiradores purificadores de aire son apropiados, usar un respirador que cubra toda la cara con combinación multi-proposito (EEUU) o tipo ABEK (EN 14387) respiradores de cartucho de respuesto para controles de ingeniería. Si el respirador es la única protección, usar un respirador suministrado que cubra toda la cara Usar respiradores y componentes testados y aprobados bajo los estándares gubernamentales apropiados como NIOSH (EEUU) o CEN (UE)

### Control de exposición ambiental

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

---

## SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

### 9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

a) Aspecto	Forma: líquido
b) Olor	Sin datos disponibles
c) Umbral olfativo	Sin datos disponibles
d) pH	Sin datos disponibles
e) Punto de fusión/ punto de congelación	Punto/intervalo de fusión: -115 °C - lit.
f) Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	98 °C - lit.
g) Punto de inflamación	27 °C - copa cerrada
h) Tasa de evaporación	Sin datos disponibles
i) Inflamabilidad (sólido, gas)	Sin datos disponibles
j) Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos	Límites superior de explosividad: 9,8 %(V) Límites inferior de explosividad: 1,7 %(V)
k) Presión de vapor	15,3 hPa a 20 °C 24,4 hPa a 25 °C
l) Densidad de vapor	2,56 - (Aire = 1.0)
m) Densidad relativa	0,808 g/cm <sup>3</sup> a 25 °C
n) Solubilidad en agua	soluble
o) Coeficiente de reparto n-octanol/agua	log Pow: 0,146
p) Temperatura de auto-inflamación	Sin datos disponibles
q) Temperatura de descomposición	Sin datos disponibles
r) Viscosidad	Sin datos disponibles
s) Propiedades explosivas	Sin datos disponibles
t) Propiedades comburentes	Sin datos disponibles

### 9.2 Otra información de seguridad

Tensión superficial	23 mN/m a 20 °C
Densidad relativa del vapor	2,56 - (Aire = 1.0)

---

## SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

### 10.1 Reactividad

Sin datos disponibles

### 10.2 Estabilidad química

Estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.

### 10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

Sin datos disponibles

### 10.4 Condiciones que deben evitarse

Calor, llamas y chispas.

### 10.5 Materiales incompatibles

Ácidos, Cloruros de ácido, Anhídridos de ácido, Oxidantes, Halógenos, Peróxidos

### 10.6 Productos de descomposición peligrosos

Otros productos de descomposición peligrosos - Sin datos disponibles

En caso de incendio: véase sección 5

---

## SECCIÓN 11: Información toxicológica

### 11.1 Información sobre los efectos toxicológicos

#### Toxicidad aguda

DL50 Oral - Rata - machos y hembras - 2.193 mg/kg  
(Directrices de ensayo 423 del OECD)

DL50 Cutáneo - Rata - machos y hembras - > 2.000 mg/kg  
(Directrices de ensayo 402 del OECD)

#### Corrosión o irritación cutáneas

Piel - Conejo

Resultado: No irrita la piel - 4 h  
(Directrices de ensayo 404 del OECD)

#### Lesiones o irritación ocular graves

Sin datos disponibles

#### Sensibilización respiratoria o cutánea

Prueba de Maximización (GPMT) - Conejillo de indias  
Resultado: No provoca sensibilización a la piel.  
(Directrices de ensayo 406 del OECD)

#### Mutagenicidad en células germinales

Prueba de Ames  
S.typhimurium  
Resultado: negativo

#### Carcinogenicidad

IARC: No se identifica ningún componente de este producto, que presente niveles mayores que o igual a 0,1% como agente carcinógeno humano probable, posible o confirmado por la (IARC) Agencia Internacional de Investigaciones sobre Carcinógenos.

#### Toxicidad para la reproducción

Toxicidad para la reproducción - Rata - Inhalación

Efectos sobre la Fertilidad: Mortalidad postimplantación: (p.e.: nº total de implantaciones muertas o reabsorbidas por nº total de implantaciones) Efectos sobre el Feto o Embrión: Muerte fetal Anormalidades Específicas del Desarrollo: Sistema musculoesquelético

Toxicidad para el desarrollo - Rata - Inhalación

Efectos sobre el Feto o Embrión: Fetotoxicidad (excepto en caso de muerte; p.e.: atrofia del feto)

#### Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

Sin datos disponibles

### **Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas**

Sin datos disponibles

### **Peligro de aspiración**

Sin datos disponibles

### **Información Adicional**

RTECS: EO1750000

Náusea, Vértigo, Dolor de cabeza, Según nuestras informaciones, creemos que no se han investigado adecuadamente las propiedades químicas, físicas y toxicológicas.

---

## **SECCIÓN 12: Información ecológica**

### **12.1 Toxicidad**

Toxicidad para los peces CL50 - Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda) - 3.670 mg/l - 96 h

Ensayo estático CL50 - Leuciscus idus melanotus - 3.520 - 3.540 mg/l - 48 h

Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos CE50 - Daphnia magna (Pulga de mar grande) - 4.227 mg/l - 48 h

### **12.2 Persistencia y degradabilidad**

Biodegradabilidad aeróbico - Tiempo de exposición 5 d  
Resultado: 86 % - Fácilmente biodegradable.

### **12.3 Potencial de bioacumulación**

Sin datos disponibles

### **12.4 Movilidad en el suelo**

Sin datos disponibles

### **12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB**

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (vPvB) a niveles del 0,1% o superiores.

### **12.6 Otros efectos adversos**

Sin datos disponibles

---

## **SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación**

### **13.1 Métodos para el tratamiento de residuos**

#### **Producto**

Quemar en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador, procediendo con gran cuidado en la ignición ya que este producto es extremadamente inflamable. Ofertar el sobrante y las soluciones no-aprovechables a una compañía de vertidos acreditada.

#### **Envases contaminados**

Eliminar como producto no usado.

---

## **SECCIÓN 14: Información relativa al transporte**

### **14.1 Número ONU**

ADR/RID: 1120

IMDG: 1120

IATA: 1120

### **14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas**

ADR/RID: BUTANOLES

IMDG: BUTANOLS

IATA: Butanols

### **14.3 Clase(s) de peligro para el transporte**

ADR/RID: 3

IMDG: 3

IATA: 3

**14.4 Grupo de embalaje**

ADR/RID: III

IMDG: III

IATA: III

**14.5 Peligros para el medio ambiente**

ADR/RID: no

IMDG Marine pollutant: no

IATA: no

**14.6 Precauciones particulares para los usuarios**

Sin datos disponibles

---

**SECCIÓN 15: Información reglamentaria**

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos de la Reglamentación (CE) No. 453/2010.

**15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla****15.2 Evaluación de la seguridad química**

Para este producto no se ha llevado a cabo una evaluación de la seguridad química

---

**SECCIÓN 16: Otra información****Texto íntegro de las Declaraciones-H referidas en las secciones 2 y 3.**

H226	Líquidos y vapores inflamables.
H319	Provoca irritación ocular grave.
H335	Puede irritar las vías respiratorias.
H336	Puede provocar somnolencia o vértigo.

**Otros datos**

Copyright 2015 Sigma-Aldrich Co. LLC. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. La información contenida en este documento esta basada en el presente estado de nuestro conocimiento y es aplicable a las precauciones de seguridad apropiadas para el producto. No representa ninguna garantía de las propiedades del producto. La Corporación Sigma-Aldrich y sus Compañías Afiliadas, no responderán por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Dirijase a [www.sigma-aldrich.com](http://www.sigma-aldrich.com) y/o a los términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega.

---

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013  
Fecha de revisión: 31.08.2015

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694  
1/15

**SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa****1.1 Identificador del producto**

Nombre del producto: Hidrógeno comprimido

Nombre comercial: Hidrógeno, Hidrógeno Seco, Hidrógeno 4.0, Hidrógeno 5.0, Hidrógeno 5.6, Hidrógeno 6.0

**Identificación adicional**

Determinación química: hidrogeno

Fórmula química: H<sub>2</sub>

Número de identificación - UE 001-001-00-9

No. CAS 1333-74-0

N.º CE 215-605-7

No. de registro REACH Los enumerados en Anexo IV/V del Reglamento n.º 1907/2006/EC (REACH) están exentos de registro.

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**

Uso identificado: Industriales y profesionales. Realizar la evaluación de riesgos antes de su uso. Propelente para aerosol. Gas resto para mezclas. Gas de calibración. Gas portador. Síntesis química. Procesos de combustión, fusión y corte. Pilas de combustible. Gas combustible para la soldadura, aplicaciones de corte, calentamiento y aplicaciones de soldadura. Uso en laboratorio. Gas para laser. Gas de proceso. Gas Test. Consumo particular.

Usos no recomendados Gas combustible. Gas propelente. Gas de protección en la soldadura con gas. Este gas no está previsto para rellenar globos para propósitos de juego y publicidad por peligro de explosión. No usar para inflar globos comerciales.

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad****Proveedor**

Abelló Linde, S. A.  
Calle Bailén 105  
E-08009 Barcelona

teléfono: +34 93 4 76 74 00

Correo electrónico: [customerservice@es.linde-gas.com](mailto:customerservice@es.linde-gas.com)

**1.4 Teléfono de emergencia: +34 93 4 76 74 00**

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013  
 Fecha de revisión: 31.08.2015

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694  
 2/15

## SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

## 2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación con arreglo a la directiva 67/548/CEE o la directiva 1999/45/CE con sus modificaciones posteriores.

F+; R12

El texto completo de todas las frases R figura en la sección 16.

Clasificación de acuerdo con el reglamento (CE) No. 1272/2008 con sus modificaciones posteriores.

## Peligros Físicos

Gas inflamable

Categoría 1

H220: Gas extremadamente inflamable.

Gases a presión

Gas comprimido

H280: Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

## 2.2 Elementos de la Etiqueta



Palabras de Advertencia: Peligro

Indicación(es) de peligro: H220: Gas extremadamente inflamable.  
 H280: Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

## Consejos de Prudencia

Prevención: P210: Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.

Respuesta: P377: Fuga de gas en llamas: No apagar, salvo si la fuga puede detenerse sin peligro.  
 P381: Eliminar todas las fuentes de ignición si no hay peligro en hacerlo.

Almacenamiento: P403: Almacenar en un lugar bien ventilado.

Eliminación: Ninguno.

2.3 Otros peligros: Ninguno.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013  
Fecha de revisión: 31.08.2015

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694  
3/15

**SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes****3.1 Sustancias**

Determinación química	hidrogeno
Número de identificación - UE:	001-001-00-9
No. CAS:	1333-74-0
N.º CE:	215-605-7
No. de registro REACH:	Los enumerados en Anexo IV/V del Reglamento n º 1907/2006/EC (REACH) están exentos de registro.
Pureza:	100% La pureza de la sustancia indicada en esta sección se utiliza únicamente con fines de clasificación y no representa la pureza real de la sustancia tal como se suministra, para conocer la cual debe consultarse otra documentación.
Nombre comercial:	Hidrógeno, Hidrógeno Seco, Hidrógeno 4.0, Hidrógeno 5.0, Hidrógeno 5.6, Hidrógeno 6.0

**SECCIÓN 4: Primeros auxilios**

**General:** A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad. La víctima no siente la asfixia. Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.

**4.1 Descripción de los primeros auxilios**

**Inhalación:** A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad. La víctima no siente la asfixia. Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.

**Contacto con los ojos:** No se esperan efectos adversos de este producto.

**Contacto con la Piel:** No se esperan efectos adversos de este producto.

**Ingestión:** La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

**4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados:** Parada respiratoria.

**4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**

**Riesgos:** Ninguno.

**Tratamiento:** Ninguno.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013  
 Fecha de revisión: 31.08.2015

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694  
 4/15

## SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

**Riesgos Generales de Incendio:** El calor puede ocasionar explosión de los recipientes.

## 5.1 Medios de extinción

**Medios de extinción apropiados:** Agua. Polvo seco. Espuma.

**Medios de extinción no apropiados:** Dióxido de carbono.

**5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla:** Ninguno.

**Productos de combustión peligrosos:** Ninguno.

## 5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

**Medidas especiales de lucha contra incendios:** En caso de incendio: Detener la fuga, si no hay peligro en hacerlo. No extinga las llamas en el lugar donde se produjo la fuga porque existe la posibilidad de reencendido incontrolado con explosión. Continuar vertiendo agua pulverizada desde un lugar protegido hasta que los contenedores permanezcan fríos. Use los extintores para contener el fuego. Aislar la fuente del fuego o dejar que se quem.

**Equipos de protección especial que debe llevar el personal de lucha contra incendios:** Los bomberos deben utilizar un equipo de protección estándar incluyendo chaqueta ignífuga, casco con careta, guantes, botas de goma, y, en espacios cerrados, equipo de respiración autónomo (SCBA, según sus siglas en inglés). Guía: EN 469: Ropa de protección contra incendios. Requisitos de funcionamiento para la ropa de protección contra incendios. EN 15090 Calzado para extinción de incendios. EN 659 Guantes de protección para extinción de incendios. EN 443 Cascos para la lucha contra incendios en edificios y otras estructuras. EN 137 Equipos de protección respiratoria - Dispositivos autónomos de circuito abierto de aire comprimido para aparato de respiración con máscara completa - requisitos, ensayos, marcado.

## SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

**6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia:** Evacuar la zona. Procure una ventilación adecuada. Considere el riesgo de atmósfera potencialmente explosiva. Eliminar todas las fuentes de ignición si no hay peligro en hacerlo. Monitorizar la concentración del producto liberado. Prevenir la entrada en alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o cualquier lugar donde su acumulación pueda ser peligrosa. Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura. EN 137 Equipos de protección respiratoria - Dispositivos autónomos de circuito abierto de aire comprimido para aparato de respiración con máscara completa - requisitos, ensayos, marcado.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694

Fecha de revisión: 31.08.2015

5/15

- 
- 6.2 Precauciones Relativas al Medio Ambiente: Impedir nuevos escapes o derrames de forma segura.
- 6.3 Métodos y material de contención y de limpieza: Procure una ventilación adecuada. Elimine las fuentes de ignición.
- 6.4 Referencia a otras secciones: Ver también secciones 8 y 13.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694

Fecha de revisión: 31.08.2015

6/15

**SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento:****7.1 Precauciones para una manipulación segura:**

Los gases a presión únicamente deben ser manipulados por personas con experiencia y adecuadamente formadas. Utilizar sólo equipo específicamente apropiado para este producto y para su presión y temperatura de suministro. Purgue el sistema con un gas inerte seco (por ejemplo helio o nitrógeno) antes de introducir el producto y cuando el sistema esté puesto fuera de servicio. Purgar el aire del sistema antes de introducir el gas. Los recipientes que contienen o han contenido sustancias inflamables o explosivos no deben ser inertizados con dióxido de carbono líquido. Evaluar el riesgo de atmósferas potencialmente explosivas y la necesidad de disponer de equipos a prueba de explosiones. Evítense la acumulación de cargas electrostáticas. Mantener lejos de fuentes de ignición, incluyendo descarga estática. Los aparatos y el equipo eléctrico usados en ambientes explosivos tienen que estar conectados a tierra. Utilizar únicamente herramientas que no produzcan chispas. Consulte al proveedor sobre instrucciones de uso y manipulación. La sustancia debe ser manipulada de acuerdo a procedimientos de correcta higiene industrial y seguridad. Asegurarse que el sistema ha sido (o es regularmente) comprobado antes de su uso para detectar que no haya fugas. Proteja los recipientes de daños físicos; no arrastrar, deslizar, rodar o tirar. No quite las etiquetas suministradas por el proveedor como identificación del contenido del recipiente. Cuando mueva los recipientes, incluso en distancias cortas, use un carro diseñado para el transporte de este tipo de recipientes. Asegurarse que los recipientes estén siempre en posición vertical y cerrar las válvulas cuando no se estén usando. Procure una ventilación adecuada. Debe prevenirse la filtración de agua al interior del recipiente. No permitir el retroceso hacia el interior del recipiente. Evitar la succión de agua, ácido y alcalino. Mantener el contenedor por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado. Cumpla con todos los reglamentos y requisitos legales locales sobre el almacenamiento de los recipientes. No comer, ni beber, ni fumar durante su utilización. Almacenar conforme a las normativas locales/regionales/nacionales/internacionales. Nunca use una llama directa o equipos eléctricos para aumentar la presión del recipiente. No retire las protecciones de las válvulas y en caso de necesidad nunca antes que el recipiente esté situado en su ubicación definitiva y asegurado en una pared o banco de trabajo adecuado. Recipientes con válvulas dañadas deben ser devueltos inmediatamente al proveedor. Cierre la válvula del recipiente después de su uso, incluso cuando esté vacío o esté conectado a un equipo. Nunca debe intentar reparar o modificar las válvulas o equipos de seguridad de los recipientes. Vuelva a colocar todas las protecciones de las válvulas tan pronto como el recipiente haya sido desconectado de su equipo. Mantenga todas las válvulas limpias y libres de aceites, petróleo o agua. Si el usuario tiene alguna dificultad en operar la válvula del recipiente, paralizar su uso y contactar con el proveedor. Nunca intente traspasar gases de un recipiente a otro. Las protecciones de las válvulas deben estar en su lugar.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013  
Fecha de revisión: 31.08.2015

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694  
7/15

**7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades:**

Todos los equipos eléctricos en las áreas de almacenamiento debe ser compatibles con el riesgo de atmósfera potencialmente explosiva. Separar de gases oxidantes y de otros materiales oxidantes durante el almacenamiento. Los envases no deben ser almacenados en condiciones que puedan favorecer la corrosión del recipiente. Los recipientes deben ser revisados periódicamente para garantizar unas correctas condiciones de uso y la inexistencia de fugas. Las protecciones de las válvulas deben estar en su lugar. Almacene los recipientes en lugares libres de riesgo de incendio y lejos de fuentes de calor e ignición. Manténgase lejos de materias combustibles.

**7.3 Usos específicos finales:** Ninguno.

**SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual****8.1 Parámetros de Control****Valores Límite de Exposición Profesional**

No se asignaron límites de exposición a ninguno de los componentes.

**8.2 Controles de la exposición****Controles técnicos apropiados:**

Utilizar sistema de permisos de trabajo (por ejemplo para actividades de mantenimiento). Asegurar la adecuada ventilación de aire. Proveer ventilación adecuada de escape general y local. Mantener las concentraciones muy por debajo de los límites de explosividad inferior. Deben utilizarse detectores de gases cuando pueden ser liberados gases inflamables. Asegure una ventilación adecuada, incluyendo una extracción local adecuada para que los límites de exposición profesional no se excedan. Los sistemas bajo presión deben ser regularmente revisados para detectar fugas. El producto debe ser utilizado en sistemas cerrados. Usar únicamente instalaciones permanentemente libres de fugas (por ejemplo tuberías soldadas). Evítese la acumulación de cargas electroestáticas.

**Medidas de protección individual, tales como equipos de protección personal****Información general:**

Debe realizarse y documentarse la evaluación del riesgo en cada área de trabajo para evaluar los riesgos relacionados con el uso del producto y para seleccionar los equipos de protección individual correspondientes al riesgo. Se deben seguir las siguientes recomendaciones. Disponer de aparato de respiración autónomo para uso en caso de emergencia. Los equipos de protección individual para el cuerpo se deben seleccionar en base a las tareas a ejecutar y a los riesgos involucrados. Consulte la normativa local para la restricción de las emisiones a la atmósfera. Vea la sección 13 para los métodos específicos para el tratamiento de gases residuales. Prohibido comer, beber y fumar durante la utilización del producto.

**Protección de los ojos/la cara:**

Use protección ocular, según la norma EN 166, cuando se utilicen gases.  
Guía: EN 166: Gafas de protección.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013 Versión: 2.0 No. FDS: 000010021694  
 Fecha de revisión: 31.08.2015 8/15

**Protección cutánea**

**Protección de las Manos:** Use guantes de protección cuando manipule los recipientes.  
 Guía: EN 388 Guantes de protección contra riesgos mecánicos.

**Protección corporal:** Llevar prendas ignífugas/resistentes al fuego/resistentes a las llamas.  
 Guía: ISO / TR 2801:2007 Ropa de protección contra el calor y el fuego -  
 Recomendaciones generales para la selección, cuidado y uso de ropa protectora.

**Otros:** Use zapatos de seguridad cuando manipule los recipientes.  
 Guía: EN ISO 20345 Equipo de protección individual - Calzado de seguridad.

**Protección respiratoria:** No requiere.

**Peligros térmicos:** No hay medidas preventivas necesarias.

**Medidas de higiene:** No son necesarias medidas de evaluación de riesgos más allá de la correcta manipulación de acuerdo a la higiene industrial y a los procedimientos de seguridad. Prohibido comer, beber y fumar durante la utilización del producto.

**Controles de exposición medioambiental:** Para información sobre la eliminación, véase la sección 13.

## SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

## 9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

## Aspecto

Forma/estado:	Gas
Forma/Figura:	Gas comprimido
Color:	Incoloro
Olor:	Inodoro
Olor, umbral:	La superación de los límites por el olor es subjetiva e inadecuada para advertir del riesgo de sobreexposición.
pH:	No aplicable.
Punto de fusión:	-259,2 °C
Punto ebullición:	-252,77 °C
Punto de sublimación:	No aplicable.
Temperatura crítica (°C):	-240,0 °C
Punto de inflamación:	No aplicable para gases y mezclas de gases
Velocidad de evaporación:	No aplicable para gases y mezclas de gases
Inflamabilidad (sólido, gas):	Gas inflamable
Límite de inflamabilidad - superior (%):	77 %(v)
Límite de inflamabilidad - inferior (%):	4 %(v)
Presión de vapor:	No se dispone de datos fiables.
Densidad de vapor (aire=1):	0,069
Densidad relativa:	0,07

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión:	16.01.2013	Versión:	2.0	No. FDS:	000010021694
Fecha de revisión:	31.08.2015				9/15

## Solubilidad(es)

Solubilidad en agua:	1,62 mg/l
Coefficiente de reparto (n-octanol/agua):	Desconocido.
Temperatura de autoignición:	560 °C
descomposición, temperatura de:	Desconocido.

## Viscosidad

Viscosidad cinemática:	No hay datos disponibles.
Viscosidad dinámica:	No hay datos disponibles.
Propiedades explosivas:	No corresponde.
Propiedades comburentes:	No aplicable.

9.2 OTRA INFORMACIÓN: Ninguno.

Peso molecular: 2,02 g/mol (H<sub>2</sub>)

## SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

10.1 Reactividad:	No existen peligros de reacción distintos de los descritos en otras secciones.
10.2 Estabilidad Química:	Estable en condiciones normales.
10.3 Posibilidad de Reacciones Peligrosas:	Puede formar atmósferas potencialmente explosivas en aire. Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.
10.4 Condiciones que Deben Evitarse:	Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.
10.5 Materiales Incompatibles:	Aire y oxidantes. Por la compatibilidad de los materiales, consultar la última versión de la norma ISO-11114.
10.6 Productos de Descomposición Peligrosos:	Bajo condiciones normales de uso y almacenamiento, no debe producirse descomposición en productos peligrosos.

## SECCIÓN 11: Información toxicológica

Información general: Ninguno.

## 11.1 Información sobre los efectos toxicológicos

Toxicidad aguda - Ingestión  
Producto A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

Toxicidad aguda - Contacto dermal  
Producto A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013  
 Fecha de revisión: 31.08.2015

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694  
 10/15

## Toxicidad aguda - Inhalación

Producto

No clasificado en cuanto a toxicidad aguda con los datos disponibles.

## Corrosión/Irritación Cutáneas

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Lesiones Oculares Graves/Irritación Ocular

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Sensibilización de la Piel o Respiratoria

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Mutagenicidad en Células Germinales

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Carcinogenicidad

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Toxicidad para la reproducción

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Toxicidad Sistémica Específica de Órganos Diana- Exposición Única

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Toxicidad Sistémica Específica de Órganos Diana- Exposiciones Repetidas

Producto

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

## Peligro por Aspiración

Producto

No aplicable para gases y mezclas de gases.

## SECCIÓN 12: Información ecológica

## 12.1 Toxicidad

## Toxicidad aguda

Producto

Sin daños ecológicos causados por este producto.

## 12.2 Persistencia y Degradabilidad

Producto

No aplicable para gases y mezclas de gases.

## 12.3 Potencial de Bioacumulación

Producto

Se supone que el producto es biodegradable y no se supone que persista en el ambiente acuático durante períodos prolongados.

## 12.4 Movilidad en el Suelo

Producto

Debido a su alta volatilidad, el producto es poco probable que cause contaminación del suelo o del agua.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión:	16.01.2013	Versión:	2.0	No. FDS:	000010021694
Fecha de revisión:	31.08.2015				11/15

## 12.5 Resultados de la valoración

## PBT y mPmB

Producto No clasificada como PBT o vPBT.

12.6 Otros Efectos Adversos: Sin daños ecológicos causados por este producto.

## SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

## 13.1 Métodos para el tratamiento de residuos

**Información general:** No descargar dentro de ningún lugar donde su acumulación pudiera ser peligrosa. Consultar con el suministrador para recomendaciones específicas. No descargar en áreas donde hay riesgo de que se forme una mezcla explosiva con el aire. El gas residual debe ser quemado a través de un quemador adecuado que disponga de antiretroceso de llama.

**Métodos de eliminación:** Consulte el código de buenas prácticas de EIGA (Doc.30 "La eliminación de gases", descargable en <http://www.eiga.org>) para obtener más orientación sobre los métodos apropiados para la eliminación. Eliminación de la botella sólo a través del proveedor. Las actividades de descarga, tratamiento o eliminación pueden estar sujetas a leyes nacionales, estatales o locales

Códigos del Catálogo Europeo de Residuos

**Contenedor:** 16 05 04\*: Gases en recipientes a presión (incluidos los alones) que contienen sustancias peligrosas.

## SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

## ADR

14.1 Número ONU:	UN 1049
14.2 Designación Oficial de Transporte de las Naciones Unidas:	HIDRÓGENO COMPRIMIDO
14.3 Clase(s) de Peligro para el Transporte	
Clase:	2
Etiqueta(s):	2.1
No. de riesgo (ADR):	23
Código de restricciones en túneles:	(B/D)
14.4 Grupo de Embalaje:	-
14.5 Peligros para el medio ambiente:	No aplicable
14.6 Precauciones particulares para los usuarios:	-

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013 Versión: 2.0 No. FDS: 000010021694  
 Fecha de revisión: 31.08.2015 12/15

## RID

14.1 Número ONU: UN 1049  
 14.2 Designación Oficial de Transporte de las Naciones Unidas: HIDRÓGENO COMPRIMIDO  
 14.3 Clase(s) de Peligro para el Transporte:  
 Clase: 2  
 Etiqueta(s): 2.1  
 14.4 Grupo de Embalaje: -  
 14.5 Peligros para el medio ambiente: No aplicable  
 14.6 Precauciones particulares para los usuarios: -

## IMDG

14.1 Número ONU: UN 1049  
 14.2 Designación Oficial de Transporte de las Naciones Unidas: HYDROGEN, COMPRESSED  
 14.3 Clase(s) de Peligro para el Transporte:  
 Clase: 2.1  
 Etiqueta(s): 2.1  
 EmS No.: F-D, S-U  
 14.3 Grupo de Embalaje: -  
 14.5 Peligros para el medio ambiente: No aplicable  
 14.6 Precauciones particulares para los usuarios: -

## IATA

14.1 Número ONU: UN 1049  
 14.2 Designación oficial de transporte: Hydrogen, compressed  
 14.3 Clase(s) de Peligro para el Transporte:  
 Clase: 2.1  
 Etiqueta(s): 2.1  
 14.4 Grupo de Embalaje: -  
 14.5 Peligros para el medio ambiente: No aplicable  
 14.6 Precauciones particulares para los usuarios: -

## OTRA INFORMACIÓN

Transporte aéreo de pasajeros y mercancías: Prohibido.  
 únicamente avión de carga: Permitido.

14.7 Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio Marpol 73/78 y del Código IBC: No aplicable

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013  
 Fecha de revisión: 31.08.2015

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694  
 13/15

## Identificación adicional:

Evitar el transporte en los vehículos donde el espacio de la carga no esté separado del compartimiento del conductor. Asegurar que el conductor está enterado de los riesgos potenciales de la carga y que conoce que hacer en caso de un accidente o emergencia. Asegurar el recipiente de gas antes del transporte. Asegurarse que las válvulas de las botellas están cerradas y no fugan. Las protecciones de las válvulas deben estar en su lugar. Asegurar la adecuada ventilación de aire.

## SECCIÓN 15: Información reglamentaria

## 15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específica para la sustancia o la mezcla:

## Legislación de la UE

Reglamento (CE) No. 1907/2006, Anexo XVII, Sustancias sujetas a restricciones aplicables a la comercialización y uso:

Determinación química	No. CAS	Concentración
hidrogeno	1333-74-0	

Directiva 96/82/CE (Seveso II) relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas:

Determinación química	No. CAS	Concentración
hidrogeno	1333-74-0	100%

Directiva 98/24/CE relativa a la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo:

Determinación química	No. CAS	Concentración
hidrogeno	1333-74-0	100%

## Reglamentaciones nacionales

Directiva 89/391/CEE sobre la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y la salud de los trabajadores en el trabajo. Directiva 89/686/CEE sobre equipos de protección personal. Directiva 94/9/CE sobre equipos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (ATEX). Sólo los productos que cumplen con los reglamentos alimentarios (CE) N° 1333/2008 y (UE) N° 231/2012 y que están etiquetados como tales pueden ser utilizados como aditivos alimentarios.

Esta Ficha de Datos de Seguridad ha sido elaborada en cumplimiento del reglamento UE 453/2010.

## 15.2 Evaluación de la seguridad química:

No se ha realizado ninguna evaluación de la seguridad química.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión: 16.01.2013

Versión: 2.0

No. FDS: 000010021694

Fecha de revisión: 31.08.2015

14/15

## SECCIÓN 16: Otra información

**Información sobre revisión:** No pertinente.

**Principales referencias bibliográficas y las fuentes de datos:**

Se han utilizado diversas fuentes de datos en la elaboración de esta FDS. Esto incluye, no de forma exclusiva, lo siguiente:

Agency for Toxic Substances and Diseases Registry (ATSDR) - Agencia para las sustancias tóxicas y registro de enfermedades (<http://www.atsdr.cdc.gov/>).

Agencia Europea de Productos Químicos: Guía para la elaboración de fichas de datos de seguridad.

Agencia Europea de Productos Químicos: Información sobre sustancias <http://apps.echa.europa.eu/registered/registered-sub.aspx#search>

European Industrial Gases Association (EIGA) Doc.169 Guía para la clasificación y etiquetado.

Programa Internacional sobre Seguridad Química (<http://www.inchem.org/>)

ISO 10156:2010 Gases y mezclas de gases - Determinación del potencial de inflamabilidad y de oxidación para la selección de válvulas de botellas.

Matheson Gas Data Book, 7ª edición.

National Institute for Standards and Technology (NIST) Standard Reference Database Number 69.

The ESIS (European chemical Substances Information System) platform of the former European Chemicals Bureau (ECB) ESIS (<http://ecb.jrc.ec.europa.eu/esis/>).

The European Chemical Industry Council (CEFIC) ERICards.

United States of America's National Library of Medicine's toxicology data network TOXNET (<http://toxnet.nlm.nih.gov/index.html>).

Los valores umbral límite (TLV) de la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH).

Información específica de la sustancia por parte de los proveedores.

Los detalles dados son ciertos y correctos en el momento de publicarse este documento.

**Enunciado de las frases R y H en los apartados 2 y 3**

H220 Gas extremadamente inflamable.

H280 Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

R12 Extremadamente inflamable.

**Información sobre formación:** Los usuarios de los aparatos de respiración deben ser entrenados. Asegurarse que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad.

**Clasificación de acuerdo con el reglamento (CE) No. 1272/2008 con sus modificaciones ulteriores.**

Flam. Gas 1, H220  
Press. Gas Compr. Gas, H280

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

## Hidrógeno comprimido

Fecha de Emisión:	16.01.2013	Versión: 2.0	No. FDS: 000010021694
Fecha de revisión:	31.08.2015		15/15

---

**OTRA INFORMACIÓN:**

Antes de utilizar el producto en un nuevo proceso o experimento, debe llevarse a cabo un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales. Asegurar la adecuada ventilación de aire. Asegúrese que se cumplen las normativas nacionales y locales. Asegúrese que el equipo esté adecuadamente conectado a tierra. A pesar de que durante la preparación de este documento se ha tomado especial cuidado, no se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o los daños.

**Fecha de revisión:**

31.08.2015

**Exención de responsabilidad:**

Se proporciona esta información sin ninguna garantía. Se cree que la información es correcta. Esta información debe usarse para hacer una determinación independiente de los métodos para proteger a los trabajadores y el medio ambiente.

Planta de Producción de Butan-2-ona

## **DOCUMENTO II**

### **Planos**

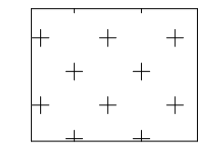
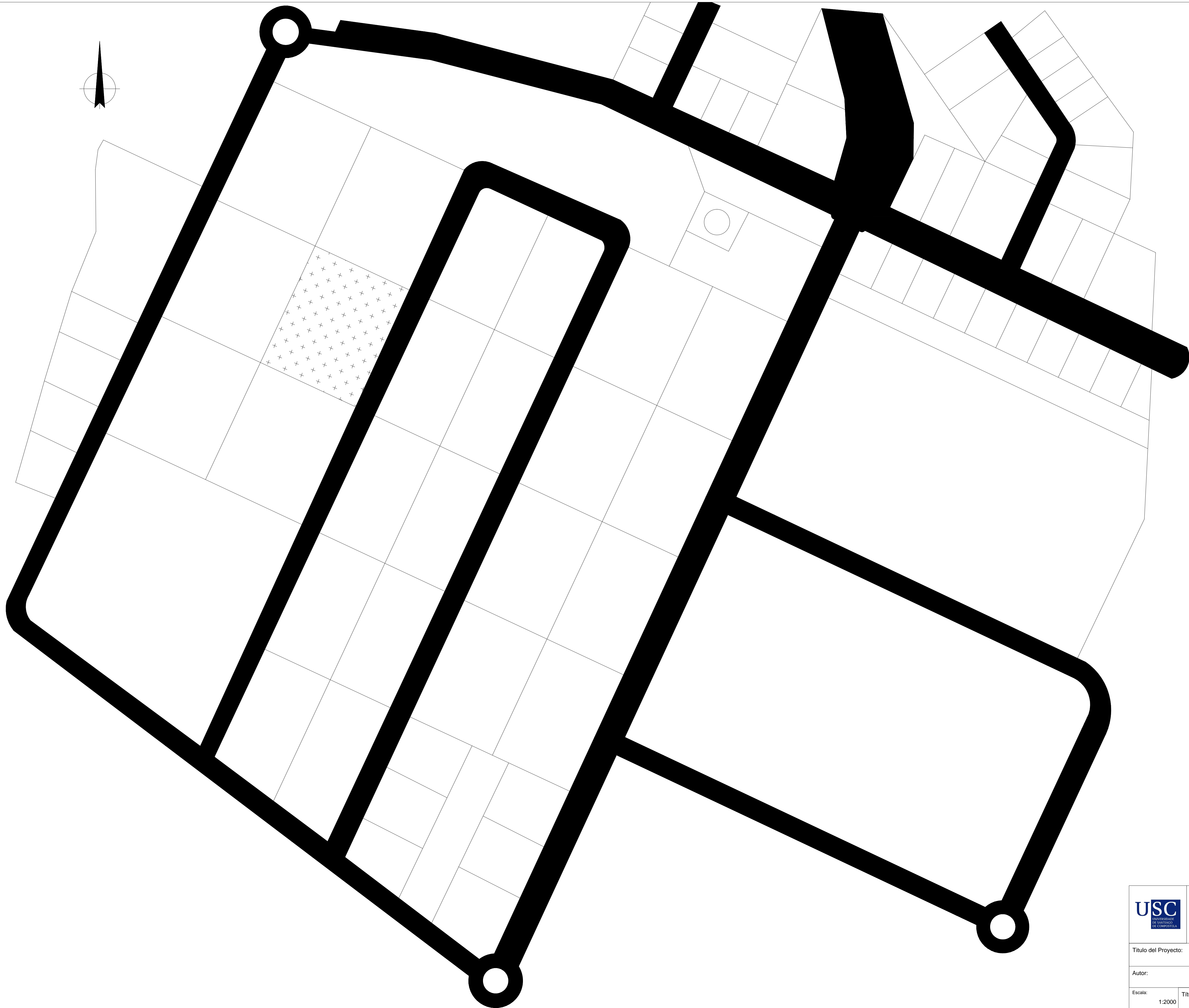
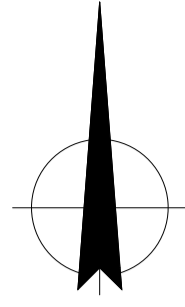
Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

*Universidade de Santiago de Compostela*

*Escola Técnica Superior de Enxeñaría*

Septiembre 2017

Pablo Otero Jorge



Parcela



Vial de acceso

Coordenadas parcela:  
43.303264 -8.46488

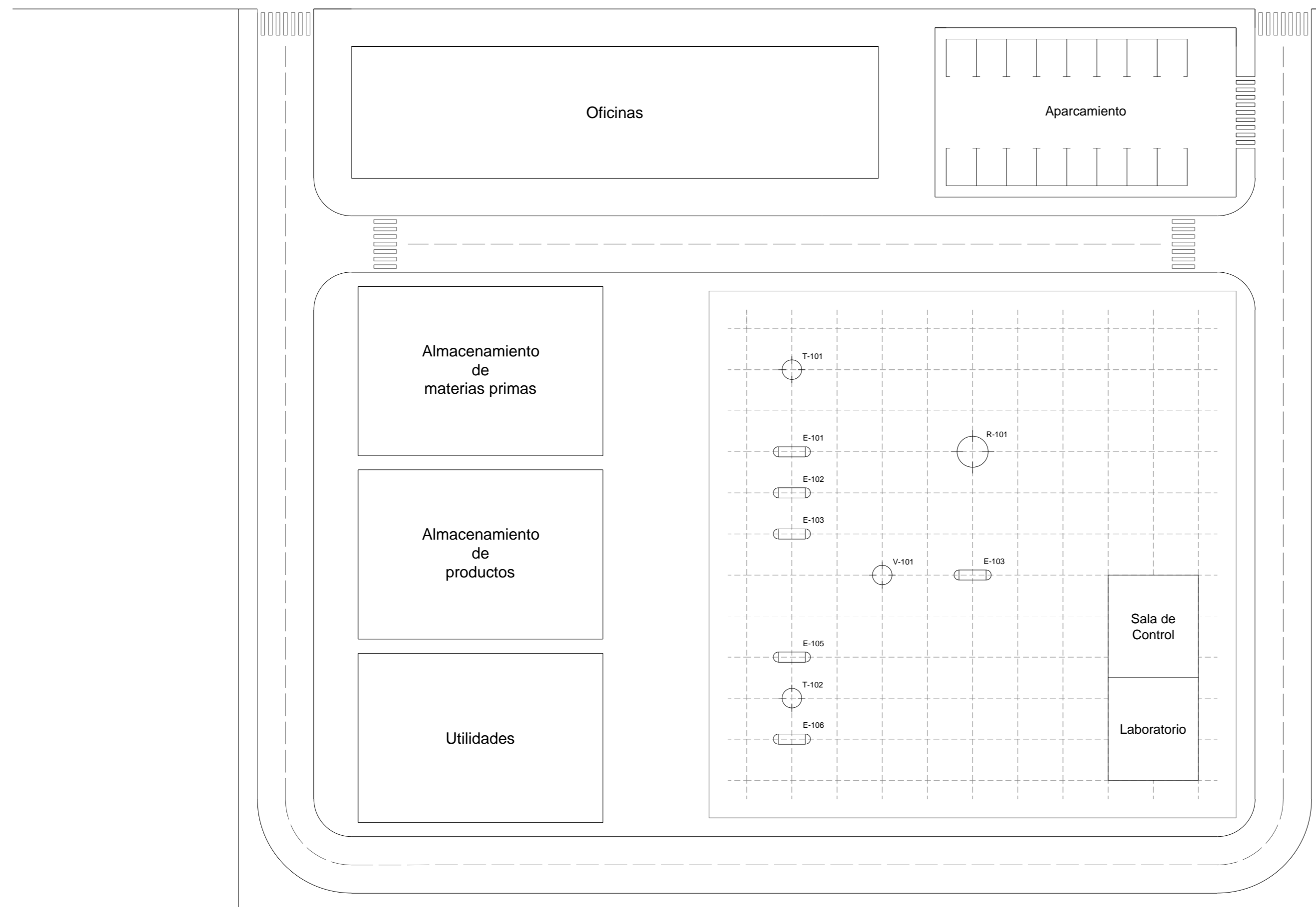
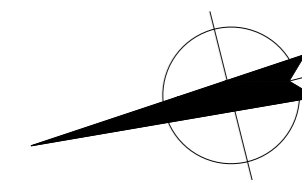


Universidade de Santiago de Compostela  
Escola Técnica Superior de Enxeñaría

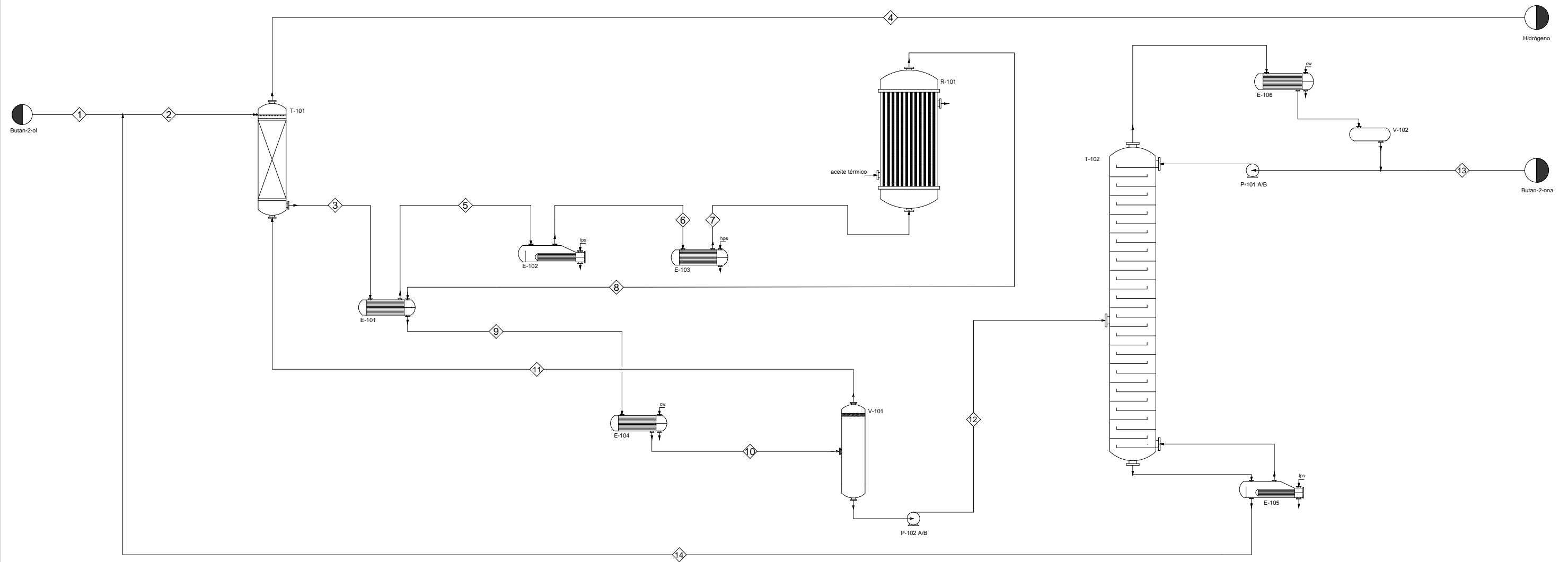
Título del Proyecto: **Planta de producción de butan-2-ona**

Autor: **Pablo Otero Jorge** Firma: Fecha: **Septiembre 2017**

Escala: **1:2000** Título del plano: **Localización** Número: **1/5**

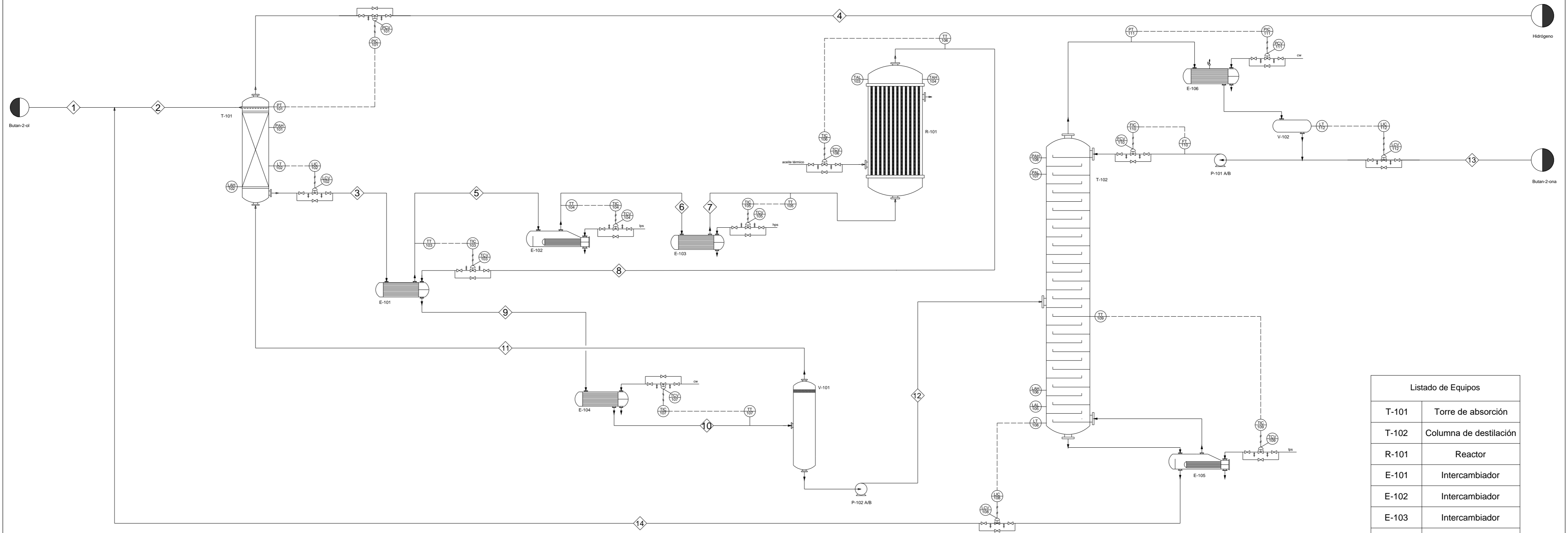


	Universidade de Santiago de Compostela Escola Técnica Superior de Enxeñaría		
Título del Proyecto:		Planta de producción de butan-2-ona	
Autor:	Pablo Otero Jorge	Firma:	Fecha: Septiembre 2017
Escala:	1:500	Título del plano:	Plano de implantación
			Número: 2/5



Número de corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°C)	25	32,36	37,63	25,04	95	98,63	260	260	194,77	25	25	25	79,52	99,09
Presión (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	157,3	101,3	227,8
Flujo másico (kg/h)	2739,98	3024,74	3285,64	135,82	3285,64	3285,64	3285,64	3285,64	3285,64	3285,64	396,72	2888,92	2604,16	284,76
Flujo molar (kmol/h)	37,00	40,84	44,49	36,90	44,49	44,49	44,49	80,53	80,53	80,53	40,54	39,98	36,14	3,84
<b>Componentes (kmol/h)</b>														
Agua	0,046	0,046	0,047	0,008	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,009	0,038	0,038	0,000
Butan-2-ol	36,954	40,759	40,044	0,845	40,044	40,044	40,044	4,004	4,004	4,004	0,130	3,875	0,070	3,804
Butan-2-ona	0,000	0,038	4,391	0,006	4,391	4,391	4,391	40,430	40,430	40,430	4,358	36,072	36,034	0,038
Hidrógeno	0,000	0,000	0,007	36,039	0,007	0,007	0,007	36,046	36,046	36,046	36,046	0,000	0,000	0,000
<b>Componentes (kg/h)</b>														
Agua	0,83	0,83	0,85	0,14	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,17	0,69	0,69	0,00
Butan-2-ol	2739,16	3021,14	2968,14	62,62	2968,14	2968,14	2968,14	296,81	296,81	296,81	9,62	287,20	5,21	281,99
Butan-2-ona	0,00	2,77	316,63	0,41	316,63	316,63	316,63	2915,30	2915,30	2915,30	314,27	2601,04	2598,27	2,77
Hidrógeno	0,00	0,00	0,01	72,65	0,01	0,01	0,01	72,67	72,67	72,67	72,67	0,00	0,00	0,00

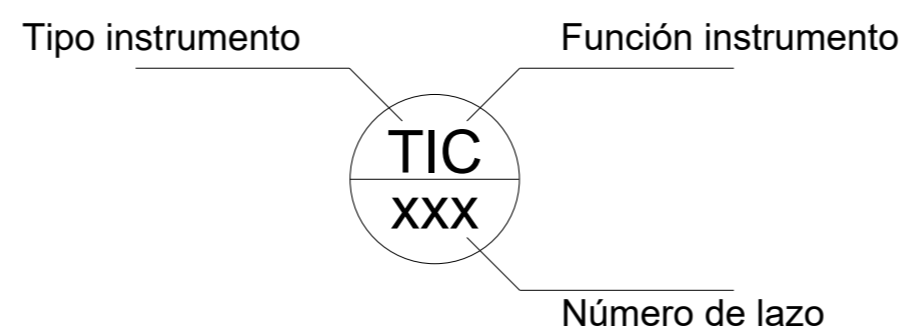
	Universidade de Santiago de Compostela Escola Técnica Superior de Enxeñaría		
	Título del Proyecto: <b>Planta de producción de butan-2-ona</b>		
Autor: <b>Pablo Otero Jorge</b>		Firma:	Fecha: Septiembre 2017
Escala: S/N	Título del plano: <b>Diagrama de flujo</b>		Número: 3/5



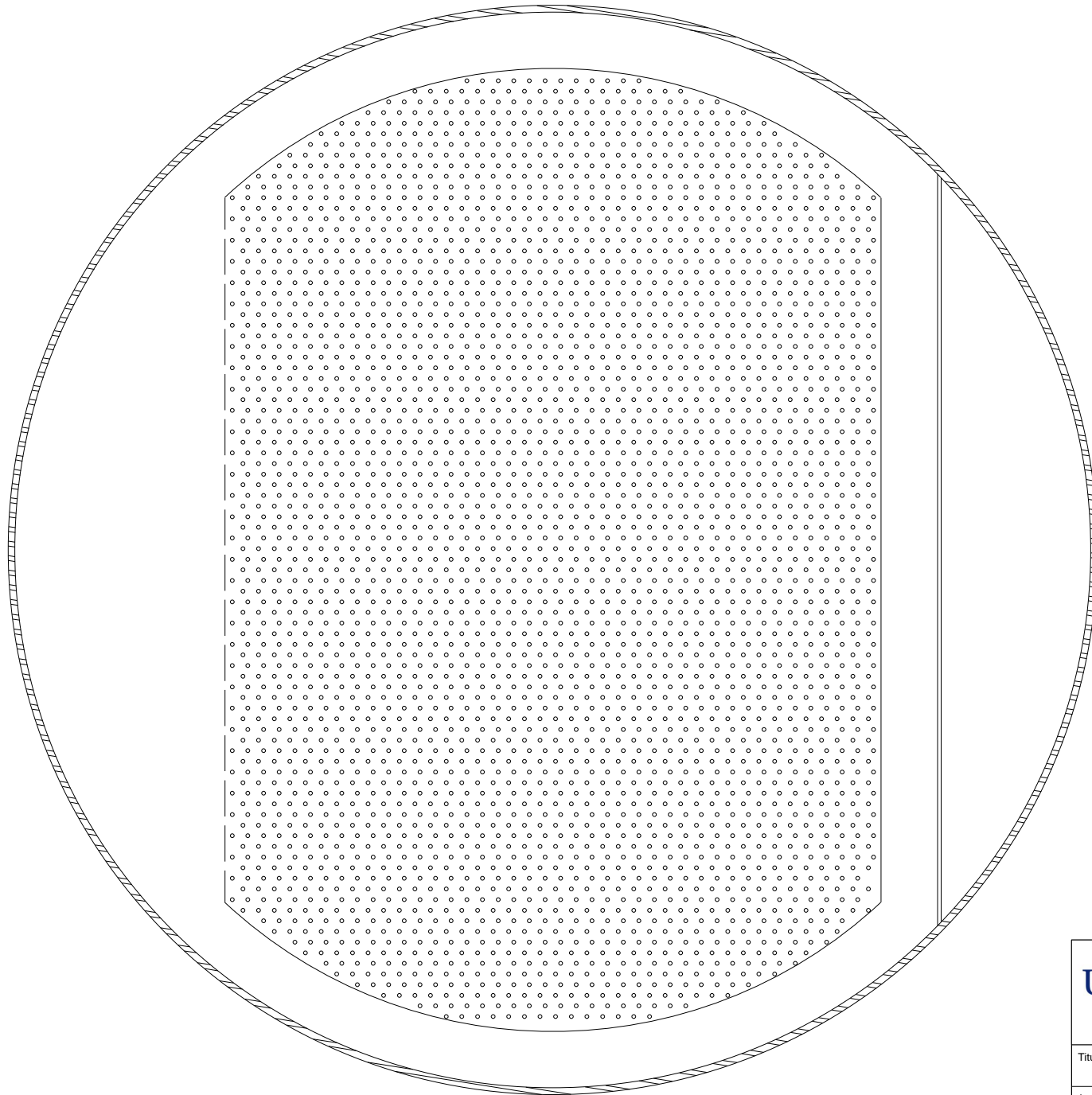
Listado de Equipos	
T-101	Torre de absorción
T-102	Columna de destilación
R-101	Reactor
E-101	Intercambiador
E-102	Intercambiador
E-103	Intercambiador
E-104	Intercambiador
E-105	Caldera
E-106	Condensador
V-101	Separador L/V
V-102	Tanque de reflujo
P-101 A/B	Bomba de reflujo
P-102 A/B	Bomba

Simbología de líneas y válvulas

Conexión a proceso	—————
Señal eléctrica	- - - - -
Señal neumática	/// //
Válvula de control	
Válvula de corte	



		Universidade de Santiago de Compostela Escola Técnica Superior de Enxeñaría	
Autor: <b>Pablo Otero Jorge</b>		Firma:	Fecha: Septiembre 2017
Escala: S/N	Título del plano: <b>P&amp;ID</b>		Número: 4/5



		Universidade de Santiago de Compostela Escola Técnica Superior de Enxeñaría	
Título del Proyecto:		Planta de producción de butan-2-ona	
Autor:	Pablo Otero Jorge	Firma:	
Fecha:		Número:	Septiembre 2017
Escala:	S/N	Título del plano:	Detalle plato T-102
		Número:	5/5

Planta de Producción de Butan-2-ona

## **DOCUMENTO III**

# **Estudios con entidad propia**

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

*Universidade de Santiago de Compostela*

*Escola Técnica Superior de Enxeñaría*

Septiembre 2017

Pablo Otero Jorge

## Índice

1.	Estudio de impacto ambiental .....	5
1.1.	Descripción del proyecto.....	5
1.2.	Análisis de alternativas viables.....	6
1.2.1.	Justificación de la ubicación .....	6
1.2.2.	Justificación de las soluciones técnicas adoptadas .....	6
1.3.	Inventario ambiental e identificación de impactos.....	8
1.3.1.	Aspectos físicos y biológicos .....	9
1.3.1.1.	Clima.....	9
1.3.1.2.	Calidad del aire.....	10
1.3.1.3.	Flora y Fauna .....	11
1.3.1.4.	Hidrología.....	11
1.3.2.	Molestias inducidas.....	11
1.3.3.	Aspectos estético-culturales .....	12
1.3.4.	Aspectos socioeconómicos .....	12
1.3.5.	Identificación y valoración de impactos.....	12
1.4.	Medidas para la reducción de impactos .....	13
1.4.1.	Medidas preventivas de carácter general.....	13
1.4.1.1.	Buenas prácticas generales de obra .....	13
1.4.1.2.	Selección de suministradores y contratistas.....	13
1.4.2.	Medidas preventivas de los impactos atmosféricos .....	14
1.4.3.	Medidas preventivas de los impactos sobre el suelo y las aguas .....	14
1.4.3.1.	Medidas generales en obra.....	14
1.4.3.2.	Prevención de fugas y derrames .....	14
1.4.4.	Substancias peligrosas.....	14
1.4.5.	Medidas preventivas de los impactos por ruido .....	15
1.4.6.	Medidas para evitar accidentes laborales.....	15
1.4.7.	Medidas para evitar explosiones e incendios .....	15

1.4.8.	Medidas para la prevención del impacto visual.....	15
1.4.9.	Medidas para la prevención del impacto social.....	16
1.4.10.	Desmantelamiento de la instalación.....	16
1.4.11.	Matriz causa-efecto.....	16
1.5.	Programa de vigilancia ambiental.....	18
1.5.1.	Descripción general.....	18
1.5.2.	Ejecución y operación.....	18
1.5.3.	Actividades de seguimiento.....	19
1.6.	Resumen del estudio.....	21
1.7.	Conclusiones.....	21
2.	Estudio básico de seguridad y salud laboral.....	22
2.1.	Antecedentes y objeto del estudio.....	22
2.2.	Datos generales de obra.....	22
2.3.	Análisis de riesgos derivados de las características del emplazamiento.....	23
2.3.1.	Accesos.....	23
2.3.2.	Propiedades colindantes.....	23
2.3.3.	Conducciones de agua.....	23
2.3.4.	Líneas eléctricas y de gas.....	24
2.4.	Análisis de riesgos en la fase de ejecución de obra.....	24
2.4.1.	Acondicionamiento del terreno.....	24
2.4.2.	Cimentación y levantamiento de estructuras.....	24
2.4.3.	Cubiertas, materiales ligeros y cierres.....	25
2.4.4.	Instalaciones auxiliares y acabados.....	25
2.5.	Medidas de protección colectiva.....	26
2.5.1.	Acondicionamiento del terreno.....	26
2.5.2.	Cimentación y levantamiento de estructuras.....	26
2.5.3.	Cubiertas, materiales ligeros y cierres.....	26
2.5.4.	Instalaciones auxiliares y acabados.....	27

2.6.	Equipos de protección individual .....	27
2.6.1.	Protectores de la cabeza (protectores del cráneo) .....	28
2.6.2.	Protección del pie.....	28
2.6.3.	Protección ocular .....	28
2.6.4.	Protección respiratoria.....	28
2.6.5.	Protección del oído .....	28
2.6.6.	Protección del tronco, los brazos y las manos .....	28
2.6.7.	Otros.....	29
2.7.	Señalización.....	29
2.8.	Trabajos posteriores.....	29
2.9.	Obligaciones de los agentes involucrados en la obra .....	30
2.9.1.	Obligaciones del promotor.....	30
2.9.2.	Obligaciones del coordinador en materia de seguridad y salud .....	30
2.9.3.	Obligaciones del empresario.....	30
2.9.4.	Obligaciones de los contratistas y subcontratistas .....	31
2.9.5.	Obligaciones de los trabajadores autónomos.....	32
2.9.6.	Obligaciones de los trabajadores .....	32
2.10.	Derechos de los trabajadores.....	32
2.11.	Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo .....	33
2.12.	Libro de incidencias.....	33
2.13.	Paralización de los trabajos.....	34
	Bibliografía .....	35

## 1. Estudio de impacto ambiental

### 1.1. Descripción del proyecto

La planta de producción de butan-2-ona está diseñada para una producción de 20.000 t/año, operando de forma continua 330 días al año, 24 horas al día. El resto de días restantes están designados para paradas de mantenimiento y cambios de catalizador.

El proceso de producción de butan-2-ona se puede dividir en las siguientes etapas:

- **Acondicionamiento:** El butan-2-ol, disponible en tanques de almacenamiento a presión atmosférica y temperatura ambiente, se debe bombear, vaporizar y calentar a la temperatura de reacción. Para ello se utilizan bombas, un intercambiador tipo *kettle*, y un intercambiador de carcasa y tubos.
- **Sección de reacción:** La corriente de butan-2-ol se alimenta a un reactor catalítico de tipo tubular. Por carcasa circula una corriente de aceite térmico, ya que la deshidrogenación es una reacción endotérmica. La temperatura de operación son 260 °C, y la presión es atmosférica. La elección del catalizador y las condiciones de operación permiten evitar reacciones secundarias significativas.
- **Eliminación de hidrógeno:** La corriente de salida del reactor se condensa parcialmente, intercambiando calor con la corriente de butan-2-ol de alimentación, y se enfría en otro intercambiador de carcasa y tubos. A continuación se envía a un separador líquido-vapor, del que se obtiene una corriente líquida con la butan-2-ona, y una corriente de hidrógeno que arrastra parte de los otros compuestos. Esta última se envía a una torre de absorción para recuperar la fracción arrastrada de butan-2-ona mediante intercambio en contracorriente con la alimentación de butan-2-ol.
- **Sección de purificación:** La corriente líquida obtenida en el separador líquido-vapor se envía a una columna de destilación, de la que se obtiene una corriente butan-2-ona a las especificaciones de producción, y una corriente de butan-2-ol al 99% de pureza que se recircula al inicio del proceso.

Los impactos ambientales de la planta vienen derivados de las siguientes fuentes:

- **Emisión de gases:** Gases procedentes de la combustión de gas natural para calentar el aceite térmico que se circula al reactor, y la generación del vapor requerido en la caldera de la columna de destilación. Adicionalmente, la butan-2-ona es un compuesto volátil, del que pueden producirse emisiones accidentales.

- **Aguas residuales:** El proceso no genera corrientes de agua contaminada, pero si se obtienen corrientes de agua residual de los usos generales en la planta, aguas pluviales y agua utilizada para la limpieza de equipos.
- **Residuos:** Se clasifican en peligrosos y no peligrosos. Los residuos peligrosos proceden del proceso, como el catalizador agotado o el aceite térmico usado y de operaciones de limpieza y mantenimiento, en las que se obtienen otros materiales contaminados.
- **Ruidos:** El ruido procede fundamentalmente de los equipos mecánicos, como bombas y compresores para el aire de instrumentación.

## **1.2. Análisis de alternativas viables**

Dentro del análisis de alternativas, se distingue la justificación de la ubicación del proyecto y la justificación de las soluciones tecnológicas adoptadas.

### **1.2.1. Justificación de la ubicación**

La planta se ubica en el parque de Actividades Económicas de Arteixo (ACTECA), comúnmente conocido como polígono industrial de Morás. La localización del polígono permite una excelente comunicación de la planta, tanto por vía marítima, al encontrarse muy próximo al puerto exterior de A Coruña, como por vía terrestre, al contar con acceso a la autopista A-6 (A Coruña-Madrid) y la autopista AG-55 (Carballo-A Coruña).

Además, la planta se encuentra localizada en una zona altamente industrializada, cercana a los polígonos de Sabón, Vío y Pocomaco, así como las plantas de Alcoa A Coruña, Ferroatlántica y Repsol. La refinería de Repsol podría llegar a suministrar una corriente de n-butenos, precursores de la materia prima del proceso (2-butanol), y el hidrogeno obtenido como subproducto podría ser de utilidad en los procesos de hidrodesulfuración e hidrocracking.

### **1.2.2. Justificación de las soluciones técnicas adoptadas**

Para evaluar las tecnologías adoptadas en el diseño de la planta se va a hacer referencia a las mejores técnicas disponibles (MTD), que aparecen recogidas en los documentos BREF (*Best Available Techniques Reference Document*), enmarcados en la Directiva de Emisiones Industriales (2010/75/EU) y la directiva IPPC (2008/1/EC).

Las mejores técnicas disponibles representan: “La fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir la base de los valores límite de emisión y otras condiciones del permiso destinadas a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente”.

En el caso de la planta de producción de butan-2-ona, el principal documento BREF de aplicación es el de compuestos orgánicos de alto volumen de producción (*Large Volume Organic Chemicals*), concretamente el borrador formal publicado en febrero de 2017 [1]. En él se detallan una serie de procesos ilustrativos, entre los que no se encuentra el de producción de butan-2-ona. Sin embargo, sí que se referencia la butan-2-ona como uno de los procesos genéricos, además de la operación de deshidrogenación.

Como principales impactos ambientales de los procesos de deshidrogenación, el documento identifica los presentes en la tabla 1.

**Tabla 1 - Principales impactos ambientales de los procesos de deshidrogenación [1]**

<b>Aire</b>	Grandes volúmenes de corrientes de venteo ricas en hidrógeno. Presencia de hidrocarburos volátiles en las corrientes de venteo.
<b>Agua</b>	Agua utilizada en <i>quenches</i> corrientes de dilución y agua para <i>deckoking</i> .
<b>Residuos</b>	Agentes extractivos como aminas, cáusticos y ácidos, polímeros, catalizadores agotados y aceites.

De los indicados en la tabla 1, son de especial relevancia para el proceso de producción de butan-2-ona la presencia de grandes corrientes de venteo ricas en hidrógeno y compuestos orgánicos volátiles, así como catalizador agotado y aceites térmicos usados como residuos.

Al no aparecer el proceso de producción butan-2-ona como un proceso ilustrativo, las MTD de aplicación se identifican en el apartado 13.1 del borrador formal, que hace referencia las MTD generales. En la tabla 2 se presentan las MTD para la reducción de las emisiones al aire, identificadas con el número con el que aparecen en el documento.

**Tabla 2 - MTD para la reducción de las emisiones atmosféricas [1]**

<b>Número</b>	<b>MTD</b>
MTD 8 a.	Recuperación de hidrógeno generado en reacciones químicas
MTD 8 b.	Recuperación de materias primas orgánicas no reaccionadas por compresión, condensación u otras técnicas de purificación
MTD 10 a, c.	Reducción de las emisiones atmosféricas de compuestos orgánicos mediante condensación y <i>scrubbing</i> húmedo.

Las técnicas presentadas en la tabla 2 se han implementado en el proceso de forma combinada: La corriente de gases de reacción se condensa (MTD 8 b.), y se envía a la torre de absorción para recuperar tanto la butan-2-ona como el butan-2-ol no reaccionado (MTD 8 b. y 10 a. c.), separándolos de la corriente de hidrógeno (MTD 8.a).

En la tabla 3, se presentan de forma análoga las MTD para la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos. La MTD 15, relacionada con el catalizador, se ha implantado al seleccionar el catalizador y las condiciones de operación que maximicen la vida útil y el rendimiento del catalizador, y al mantener monitorizadas dichas condiciones mediante el sistema de control del reactor. La MTD 16 se implanta con la recuperación del butna-2-ol en la columna de destilación, ya que este actúa como disolvente en la torre de absorción.

**Tabla 3 - MTD para la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos [1]**

<b>Número</b>	<b>MTD</b>
MTD 15	Selección, protección, optimización y monitorización del catalizador.
MTD 16	Recuperación y reutilización de disolventes orgánicos mediante técnicas apropiadas.

En la tabla 4 se recogen las MTD aplicadas para la reducción de los residuos generados en el proceso. La MTD 17 c. se implanta en el proceso mediante la recuperación 2-butanol tanto de la corriente de hidrógeno, como en la etapa de destilación, y la MTD 17 d. se aplica al regenerar el catalizador al final de su vida útil.

**Tabla 4 - MTD para la reducción de residuos [1]**

<b>Número</b>	<b>MTD</b>
MTD 17 c.	Recuperación de materias primas de corrientes residuales.
MTD 17 d.	Regeneración del catalizador.

### **1.3. Inventario ambiental e identificación de impactos**

El presente apartado tiene como objetivo la identificación de los impactos medioambientales de la planta en el entorno en el que se enmarca. Para ello se describe la situación previa a la implantación de la instalación, que se compara con el estado una vez finalizado el proyecto. Una vez identificados los principales impactos, se presentarán medidas para su minimización en el siguiente apartado

Se van a tratar una serie de factores, que se pueden agrupar en:

- Elementos del medio biológico y físico.
- Molestias inducidas sobre la población.
- Elementos estéticos-culturales.
- Aspectos socioeconómicos y gestión territorial.

### 1.3.1. Aspectos físicos y biológicos

#### 1.3.1.1. Clima

El estudio climático extremadamente relevante, ya que condiciona el resto de factores del medio en el que se enmarca la instalación, como el suelo, la vegetación y la fauna. La planta se encuentra en el término municipal de Arteixo, siendo la estación meteorológica más cercana la de Coruña ciudad, cuyos datos climatológicos normales se indican en la tabla 5.

Los datos responden a un clima oceánico con transiciones a clima mediterráneo: los veranos son secos, las primaveras templadas y los otoños e inviernos lluviosos e inestables, con fuertes vientos

Tabla 5 - Valores climatológicos para la ciudad de A Coruña [2]

Mes	T media (°C)	T máxima (°C)	T mínima (°C)	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)
Enero	10.8	13.5	8.1	112	75
Febrero	11.1	14.1	8.0	88	73
Marzo	12.4	15.5	9.2	75	72
Abril	13.0	16.2	9.9	88	73
Mayo	15.0	18.1	12.0	74	75
Junio	17.4	20.6	14.3	44	76
Julio	19.0	22.1	15.9	34	77
Agosto	19.6	22.8	16.4	35	77
Septiembre	18.6	22.0	15.2	64	76
Octubre	16.1	19.1	13.0	130	77
Noviembre	13.3	16.0	10.5	138	77
Diciembre	11.5	14.1	8.9	131	75
<b>Anual</b>	<b>14.8</b>	<b>17.8</b>	<b>11.8</b>	<b>1014</b>	<b>75</b>

De los datos se extraen las siguientes conclusiones:

- Se trata de una zona con un alto volumen de precipitaciones, con una media anual de 1014 mm, concentradas en especialmente en los últimos meses del año (Octubre-Diciembre).
- La humedad relativa es alta (75 %), y la media mensual nunca baja del 70 %.
- Las temperaturas son suaves tanto en verano como en invierno, con una temperatura media anual de 15 °C.

El impacto de la instalación sobre el estado de la climatología local es despreciable, y se valora como positivo el clima lluvioso y con fuertes vientos, que favorezcan la dispersión de posibles contaminantes en caso de un escenario de fuga accidental.

### 1.3.1.2. Calidad del aire

La calidad del aire se va a medir en referencia al Real Decreto 102/2011, y a sus correcciones y modificaciones (RD 39/017, RD 678/2014), cuyo objetivo es, tal y como se expone en su artículo primero, apartado a: “definir y establecer objetivos de calidad del aire, de acuerdo con el anexo III de la Ley 34/2007, con respecto a las concentraciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno, monóxido de carbono, ozono, arsénico, cadmio, níquel y benzo(a)pireno en el aire ambiente”.

El Real Decreto presenta para cada una de estas sustancias el valor límite horario y/o anual para un volumen de un metro cúbico en condiciones normales. Los valores se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 - Valores límite para los contaminantes

Contaminante	Valor límite anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
SO <sub>2</sub>	350 (diario)
NO <sub>2</sub>	40
PM 10	40
PM 2,5	25
Plomo	0,5
Benceno	5
CO	10 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
Ozono	120
Arsénico	6 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )
Cadmio	5 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )
Níquel	20 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )

La planta de producción de butan-2-ona no emite como parte del proceso ninguno de los contaminantes enumerados, pero sí existen emisiones de gases de combustión (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>) derivadas de las utilidades, fundamentalmente de la combustión de gas natural para la generación de vapor en las calderas. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se deben regular en base al Real Decreto 101/2008 de 28 de enero, por el que se establecen las normas básicas que han de regir los sistemas de acreditación y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero.

El estado de la calidad del aire previo a la implantación de la instalación se puede evaluar a partir de los datos proporcionados por Meteogalicia, concretamente para el resumen anual del 2016 en la estación de A Coruña – Riazor. La calidad del aire es buena, ya que todos los valores obtenidos para los contaminantes expuestos en la tabla 6 se encuentran por debajo de los límites establecidos por la legislación. [3]

### **1.3.1.3. Flora y Fauna**

El impacto de sobre la flora y fauna local es reducido, ya que la planta se instala en el marco de un polígono industrial localizado en una zona altamente industrializada (polígonos de Arteixo, Vío y Pocomaco, complejo industrial de Repsol, Ferroatlántica y central térmica de Sabón).

### **1.3.1.4. Hidrología**

Cercanos al polígono en el que se localiza la instalación, se encuentran principalmente dos cursos de agua: el río de Arteixo, que se encuentra a aproximadamente un kilómetro de la parcela, y atraviesa el núcleo urbano de Arteixo para desembocar en la playa de Rañobre, y el río do Seixedo, que se encuentra a unos 400 metros de la parcela y desemboca al embalse de Rosadoiro.

## **1.3.2. Molestias inducidas**

En este apartado se pretende valorar los impactos sobre la calidad de vida de la población cercana, fundamentalmente por ruidos, tanto durante la fase de construcción, como durante la operación.

La planta se encuentra en un polígono, alejado del centro urbano de Arteixo (unos dos kilómetros), pero cercano a otras parroquias como la de Morás, o a urbanizaciones. El impacto se ve mitigado al encontrarse en una zona cercana a una autovía y previamente industrializada, en la que la planificación del uso del territorio debe minimizar los impactos sobre la población.

Es necesario respetar la legislación vigente en materia de contaminación acústica, horarios de operación, y otros factores relevantes. En concreto se hace referencia a la Ley 37/2003, que tiene como objeto la prevención, vigilancia y reducción de la contaminación acústica, para evitar y reducir los daños que pueden derivarse sobre la salud humana, los bienes y el medio ambiente. En ella se define como área acústica específica aquellos sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial, y la actividad industrial como un emisor acústico. La ley se desarrolla en el Real Decreto 1367/2007, en que se definen tres índices de ruido según el periodo del día: Ld, día de 7:00 a 19:00, Le, tarde de 19:00 a 23:00, y Ln, noche de 23:00 a 7:00. Los valores para los sectores del territorio con predominio de suelo industrial se indican en la tabla 7.

**Tabla 7 - Objetivos de calidad acústica**

<b>Índice (dB)</b>	<b>Ld</b>	<b>Le</b>	<b>Ln</b>
Sector Suelo Industrial	75	75	65

### **1.3.3. Aspectos estético-culturales**

Al encontrarse en suelo de uso industrial el impacto estético de la planta es limitado, ya que se encuentra rodeado de instalaciones similares, y de infraestructuras como autopistas y carreteras.

Evaluando el patrimonio artístico-histórico cercano, no se encuentran elementos relevantes de especial interés a los que pueda afectar el desarrollo de la obra y la operación de la instalación.

### **1.3.4. Aspectos socioeconómicos**

El municipio de Arteixo cuenta con una población de 31.239 habitantes, y la ciudad de A Coruña con otros 243.978. Las principales actividades económicas son el sector servicios y el sector industrial, junto con las actividades marítimas.

La construcción y operación de la planta revierten de forma positiva sobre la economía local, generando puestos de trabajo directos e indirectos, a cubrir en su mayoría por la población cercana, incluso en el caso de puestos técnicos, aunque estos podrían requerir personal específico no disponible en la zona.

### **1.3.5. Identificación y valoración de impactos**

La medición de los impactos descritos en los apartados anteriores se puede realizar atendiendo a los siguientes aspectos:

- Extensión: mide la influencia del proyecto en relación con el entorno como el porcentaje del mismo en el que se manifiesta el efecto.
- Momento: considera el tiempo entre la ejecución del proyecto, y la aparición del efecto.
- Reversibilidad: indica la posibilidad de recuperar el estado previo al efecto producido.
- Persistencia: se refiere a la duración del efecto una vez que se ha producido, pudiendo ser su eliminación por medios naturales, o por medidas correctoras.
- Acumulación: trata el incremento progresivo de la intensidad del efecto, si este persiste en el tiempo.
- Periodicidad: manifiesta la regularidad de la aparición del efecto.
- Recuperabilidad: indica la posibilidad de recuperar las condiciones preoperacionales mediante la intervención humana.

Son de poca relevancia, como se mencionó en los apartados anteriores, los efectos sobre la flora, la fauna y el clima, debido a la localización en una zona altamente industrializada

De mayor relevancia son los efectos sobre la calidad del aire, la hidrología, el suelo y las posibles molestias a la población. Durante la fase de obra, generan un alto impacto circulación de maquinaria pesada y camiones, que generan ruido y emisiones a la atmosfera de gases de combustión, los movimientos de tierra, que levantan material particulado como arena y polvo, y las aguas residuales procedentes de operaciones de excavación y lavado.

Durante la operación, los principales efectos tendrán lugar sobre el aire, con posibles fugas de hidrógeno y productos orgánicos, así como con la emisión de gases de combustión en las calderas, sobre el agua por infiltración de agua de lluvia y posibles derrames, y sobre la población por el ruido generado en la operación.

Como impacto positivo, se identificó anteriormente la repercusión sobre la economía local, generando puestos de trabajo tanto para operarios como para personal altamente cualificado. Además, la venta del producto (butan-2-ona), puede ser atractivo para empresas productoras de pinturas y esmaltes, estableciendo un mercado que puede atraer nuevas empresas a la zona.

#### **1.4. Medidas para la reducción de impactos**

En este apartado se presenta una serie de medidas preventivas y correctoras que tienen como objeto la minimización de los impactos identificados en el apartado anterior.

##### **1.4.1. Medidas preventivas de carácter general**

###### **1.4.1.1. Buenas prácticas generales de obra**

Durante la obra se deben evitar los impactos mencionados anteriormente (levantamiento de polvo, ruidos y contaminación por infiltración de agua), fundamentalmente a través de las siguientes medidas: evitar la limpieza y el mantenimiento de la maquinaria en el sitio de la obra, para evitar infiltraciones de agua y fugas de aceites y combustibles, minimizar la actividad durante el horario nocturno, y reducción de las emisiones utilizando maquinaria en buen estado que cumpla la normativa medioambiental.

###### **1.4.1.2. Selección de suministradores y contratistas**

Priorizar la selección de empresas que puedan garantizar una gestión medioambiental adecuada durante el período de obra, especialmente en relación a los residuos. Los residuos inertes deben recogerse, y depositarse en zonas adecuadas, y los residuos peligrosos deben entregarse a un gestor autorizado para que se realice su tratamiento conforme a la legislación vigente.

#### **1.4.2. Medidas preventivas de los impactos atmosféricos**

Durante la fase de obra, se deben llevar a cabo aquellas medidas que permitan minimizar la emisión de gases de combustión y polvo a la atmósfera.

En la fase de operación, se tomarán las medidas identificadas en el apartado en el apartado 1.2.2, las MTD para la minimización de la contaminación atmosférica.

#### **1.4.3. Medidas preventivas de los impactos sobre el suelo y las aguas**

##### **1.4.3.1. Medidas generales en obra**

Para minimizar los daños sobre el suelo y las aguas durante la obra, se aplicarán las siguientes medidas:

- Revisión periódica de maquinaria y equipos.
- Limpieza de vehículos en sitios especialmente designados.
- Evitar el vertido de aguas con sólidos en suspensión sin decantación previa.
- Evitar filtraciones en las naves, asegurando un espesor suficiente de la solera de hormigón.

##### **1.4.3.2. Prevención de fugas y derrames**

Durante la obra, se debe tener un almacenamiento adecuado de las materias primas para evitar las fugas.

En la fase de operación, se deben evitar las fugas que puedan ocurrir tanto en la batería de proceso como fuera de ella. Las fugas de productos químicos tienen una alta repercusión sobre el medio ambiente y la salud humana, y las operaciones de limpieza y saneamiento son muy costosas. Por ello, el almacenamiento de las sustancias que puedan resultar peligrosas debe realizarse de forma adecuada, en zonas donde la probabilidad de accidente sea mínima, y además durante las fases de diseño y operación, se deben realizar estudios de identificación de escenarios de fuga accidental, que se deben dimensionar de acuerdo a códigos aceptados internacionalmente.

##### **1.4.4. Sustancias peligrosas**

En relación a las sustancias peligrosas presentes en el proceso, se deben cumplir las indicaciones de la normativa Seveso (RD 840/2015), tal y como se expone en el apartado de seguridad de la memoria del presente proyecto. También cabe tener en cuenta el RD 379/2001 y sus instrucciones complementarias, de almacenamiento de productos químicos, así como el BREF de emisiones procedentes de almacenamientos (*Emissions from storage*) del 2006.

#### **1.4.5. Medidas preventivas de los impactos por ruido**

Los niveles de ruido se verán incrementados de forma inevitable durante la fase de construcción, pero se debe asegurar el cumplimiento de la legislación vigente, detallada en el apartado 1.3.2. Se intentará además facilitar la fluidez del tráfico, para reducir los tiempos de exposición al funcionamiento de la maquinaria pesada.

Durante la fase de operación, se minimizarán los ruidos aislando siempre que sea posible los equipos mecánicos.

#### **1.4.6. Medidas para evitar accidentes laborales**

Se debe seguir la legislación vigente en materia de seguridad laboral, entre la que se destaca:

- La Ley 31/1995 con sus modificaciones, de Prevención de Riesgos Laborales.
- El RD 1627/1197 y sus modificaciones, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en obras de construcción.
- El RD 39/1197 y sus modificaciones y desarrollos, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- El RD 1109/2007 por el que se desarrolla la Ley 32/2006, reguladora de la subcontratación en el Sector de la Construcción.
- Resolución de 28 de febrero de 2012, de la Dirección General de Empleo, por la que se registra y se publica el V Convenio colectivo del sector de la construcción.
- EL RD 314/2006 por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

#### **1.4.7. Medidas para evitar explosiones e incendios**

La instalación eléctrica debe ajustarse a lo especificado por el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Adicionalmente, las medidas de lucha contra incendios deben cumplir el RD 2257/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra Incendios en los Establecimientos Industriales.

Para la prevención de las explosiones, se debe cumplir con el RD 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo,

#### **1.4.8. Medidas para la prevención del impacto visual**

Como ya se ha mencionado, el impacto visual de la planta se ve minimizado al enmarcarse en un polígono industrial, en una zona altamente industrializada. Adicionalmente, se trata de minimizar el impacto mediante barreras visuales entre los alrededores y la obra/planta.

#### **1.4.9. Medidas para la prevención del impacto social**

Es necesario garantizar el acceso de la población a la información acerca de la seguridad de la planta, así como los requerimientos de actuación en caso de emergencia, cumpliendo con los requisitos de participación expuestos por la directiva Seveso III.

Adicionalmente, se debe trabajar para que la actividad industrial revierta de forma positiva sobre la población local. Más allá del impacto directo sobre la economía local, se deben desarrollar planes de inversión social y programas de información acerca del trabajo que se desarrolla en la planta, con un énfasis sobre la importancia de la seguridad, tanto laboral como en la operación industrial.

#### **1.4.10. Desmantelamiento de la instalación**

Es necesario planificar con vistas al final de la vida útil de la instalación para asegurar una recuperación adecuada del medio. También es importante asegurar la seguridad de los trabajadores durante el desmantelamiento de la planta.

Los materiales y residuos resultantes tras el desmantelamiento de la instalación se deben clasificar en peligrosos, que serán eliminados por un gestor autorizado, e inertes, que según su tipo y condiciones se pueden reutilizar o enviar a vertedero, como material de relleno.

#### **1.4.11. Matriz causa-efecto**

Se utiliza una matriz como herramienta para la visualización condensada de los impactos comentados en los apartados anteriores. Para la identificación de los impactos se utiliza un código de colores, blanco sin efecto, verde para impacto positivo, rojo para aquellos que sean negativos y gris si es insignificante.

Se clasifican los impactos según ocurran durante la fase de construcción (tabla 8) o durante las fases de explotación y desmantelamiento (tabla 9).

Tabla 8 - Matriz causa-efecto para la fase de construcción

Medio	Tráfico de vehículos	Maquinaria pesada	Acondicionamiento terreno	Almacenamiento del material de obra	Construcción y montaje de la instalación
Clima					
Calidad del Aire	Red				
Flora y Fauna	Red				
Hidrología	Red			Red	Red
Ruido	Red		Red		Red
Estético-Cultural	Red				Red
Socioeconómico					Verde

Tabla 9 - Matriz causa-efecto para las fases de explotación y desmantelamiento

Medio	Funcionamiento normal	Escenario de accidente	Operaciones de mantenimiento	Desmantelamiento de la instalación
Clima				
Calidad del Aire	Red	Red	Red	
Flora y Fauna		Red		
Hidrología	Red	Red	Red	Red
Ruido	Red	Red	Red	Red
Estético-Cultural	Red	Red	Red	Verde
Socioeconómico	Verde	Red	Verde	Verde

## **1.5. Programa de vigilancia ambiental**

### **1.5.1. Descripción general**

Se planifica un Programa de Seguimiento y Vigilancia Ambiental que tiene como objetivo controlar los posibles impactos medioambientales derivados del proyecto. El programa cumple los siguientes criterios:

- Seguimiento y control de todas las actuaciones durante las obras de ejecución del proyecto, incluyendo el período de garantía.
- Seguimiento y control de las condiciones de ambientales durante la fase de explotación del proyecto.

El programa de vigilancia ambiental se lleva a cabo por una entidad ajena al diseño del proyecto, que debe estar ligada a la dirección de obra e integrada en la asesoría ambiental de la misma. El programa requiere de medios humanos y materiales:

- Medios humanos: se requiere personal con experiencia y formación en el ámbito de la evaluación ambiental y el seguimiento de obras, que puedan interpretar los datos y solucionar los problemas encontrados. Se dispondrá de un responsable medioambiental y un equipo de consultores expertos.
- Medios materiales: Se pondrá a disposición del personal del equipo de vigilancia los equipos que estimen necesarios para la realización de las mediciones pertinentes y el registro del estado del seguimiento.

### **1.5.2. Ejecución y operación**

La ejecución del programa de vigilancia ambiental sigue un orden definido, a fin de mejorar la eficacia y facilitar las labores. Se comienza por realizar un inventariado y puesta a punto de los medios de vigilancia, tanto materiales como humanos. Finalizada esta etapa, se procede a la recogida de datos, que se deben almacenar y clasificar de forma ordenada, para facilitar una revisión sistemática posterior. Posteriormente, una vez revisados los datos, se utilizan las conclusiones extraídas para elaborar un plan de acción, donde se identifique el origen de los fallos, y las medidas correctoras a implantar.

Una vez implantadas las medidas recomendadas, se continúa la observación para retroalimentar el proceso de vigilancia ambiental, convirtiéndolo en un proceso de mejora continuo que permita una mayor eficacia. Durante ambas etapas se generará documentación que recoja los detalles del proceso, recogida a continuación:

- Archivo de medios materiales: recoge la información pertinente acerca de los medios materiales utilizados en el programa. Se deben recopilar las garantías e información técnica de los productos, así como los informes de realización de reparaciones y otros.
- Diario de Seguimiento ambiental: recopila toda la información obtenida de las observaciones realizadas y de las medidas adoptadas, así como el nivel de cumplimiento de las normas medioambientales y de seguridad laboral. Debe estar a disposición de las autoridades ambientales competentes.
- Informes-Resumen periódicos: constituyen un resumen sobre las observaciones y los resultados obtenidos y recomendaciones efectuadas por la asesoría ambiental del programa. Se realizarán con frecuencia mensual durante la fase de obra, y anual durante la de explotación.
- Informe anual de medidas correctoras: recopila la eficacia, rendimiento, grado de aplicación y resultados obtenidos de las medidas correctoras. En los casos en los que las medidas correctoras introducidas sean insuficientes, se produzcan nuevos impactos ambientales o se aparezcan medidas más eficaces, el documento incluirá nuevas medidas.

### **1.5.3. Actividades de seguimiento**

Se identifican los aspectos a controlar, la finalidad, la ubicación de control, el medio de control, la periodicidad y los parámetros de control para los principales impactos identificados: clima, calidad del aire, calidad de las aguas, ruidos e impacto visual:

- Clima:
  - Aspectos a controlar: variables climáticas significativas.
  - Finalidad: evitar impactos climatológicos derivados de la construcción y la operación de la planta.
  - Ubicación de control: la estación meteorológica estatal más cercana (A Coruña, Riazor).
  - Medio de control: comparación de los datos medios en la situación preoperacional con los datos obtenidos.
  - Duración y periodicidad: anualmente, durante las etapas de construcción y explotación.
  - Parámetros de control: temperaturas medias, máximas y mínimas, precipitación y humedad relativa.

- Calidad del aire:
  - Aspectos a controlar: emisiones atmosféricas.
  - Finalidad: minimizar el impacto de las obras y la fase de explotación sobre la calidad del aire, cumpliendo con los límites de emisión establecidos por la legislación.
  - Ubicación de control: en las zonas de la planta en las que se puedan producir fugas de las corrientes de hidrógeno, y en la salida de gases de las calderas.
  - Medio de control: equipos de medición y observación.
  - Duración y periodicidad: de forma mensual durante la fase de obra, y cuando haya incidencias significativas durante la fase de explotación.
  - Parámetros de control: niveles de emisión de los principales contaminantes atmosféricos, hidrógeno y productos orgánicos.
  
- Ruidos:
  - Aspectos a controlar: nivel de ruido en la zona de la planta
  - Finalidad: minimizar las emisiones de ruido durante las fases de construcción y explotación, de forma que se reduzca el impacto sobre la población y el medio ambiente.
  - Ubicación de control: exterior de la planta
  - Medio de control: sonómetro.
  - Duración y periodicidad: de forma semanal durante la fase de obra y mensual durante la explotación.
  - Parámetros de control: niveles de ruido en los tres periodos definidos por la legislación, como se indica en apartados anteriores.
  
- Impacto visual:
  - Aspectos a controlar: alteraciones significativas del paisaje.
  - Finalidad: minimizar el impacto visual sobre el medio natural cercano a la instalación.
  - Ubicación de control: parcela de la instalación
  - Medio de control: observación visual
  - Duración y periodicidad: planificación y previa a la fase de obra, y revisión periódica durante la obra.
  - Parámetros de control: orden y limpieza, y nivel de impacto visual sobre el medio.

### **1.6. Resumen del estudio**

El presente Estudio de Impacto Ambiental del proyecto para la planta de producción butan-2-ona (MEK) por deshidrogenación catalítica de butan-2-ol (SBA), se realiza con el objetivo de ofrecer una recopilación de información técnica relevante a la autoridad competente en materia medioambiental, centrada en los impactos que pueden derivarse de la construcción y la explotación de la planta.

El documento desarrolla una breve descripción de la instalación de producción de butan-2-ona, justificando la ubicación y las soluciones técnicas seleccionadas; estas últimas de acuerdo a los documentos BREF de relevancia, entre los que se destaca el documento para la producción de Compuestos Orgánicos de Alto Volumen de Producción (*LVOC* por sus siglas en inglés). A continuación, se realiza un inventario ambiental que detalla las condiciones preoperacionales más significativas, sobre las que se pueden producir una serie de impactos que se analizan de forma pormenorizada, y para los que se proponen una serie de medidas preventivas y correctoras. Por último, se detalla un Programa de Vigilancia Ambiental para indicar los mecanismos de seguimiento y control sobre los impactos identificados.

### **1.7. Conclusiones**

Finalizado el estudio se puede realizar una valoración global del impacto que la planta tiene sobre el entorno, en el que la mayor parte de los impactos son poco o moderadamente significativos, siempre que se asegure una operación correcta durante la fase de obra y la de explotación, y cuyo impacto debe limitarse mediante la monitorización constante y la aplicación de medidas correctoras. De ellos, los impactos más destacables son:

- Ruidos, especialmente durante la fase de obra, que pueden repercutir sobre la calidad de vida de la población si no se controlan.
- Contaminación atmosférica, por levantamiento de polvos y emisiones de gases de escape de vehículos y maquinaria durante la fase de obra, y por posibles fugas en escenarios de accidente durante la fase de explotación.
- Calidad de las aguas, por operaciones de lavado durante la obra, y por infiltración y fugas durante la operación.
- Riesgos de accidentes laborales, especialmente durante la fase de obra.

Por último, cabe destacar el efecto positivo sobre la economía local, con la creación de nuevos puestos de trabajo directos e indirectos, y la dinamización de los sectores industriales locales.

## **2. Estudio básico de seguridad y salud laboral**

En este documento se realiza un estudio para la seguridad laboral y la salud de los trabajadores en referencia a los productos, equipos y dispositivos involucrado en el proceso, que pretende servir de base para la elaboración del Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo.

### **2.1. Antecedentes y objeto del estudio**

El estudio tiene como objetivo establecer una serie de disposiciones de seguridad y salud que permitan la prevención del riesgo de accidentes laborales y la minimización de sus impactos, así como de las enfermedades laborales. Para ello, se describe la organización, los procedimientos y los medios de seguridad a emplear en el proyecto.

El documento se elabora de conformidad a la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, que en su artículo segundo, apartado primero, indica como objeto “promover la seguridad y la salud de los trabajadores mediante la aplicación de medidas y el desarrollo de las actividades necesarias para la prevención de riesgos derivados del trabajo”, y en el artículo 16 establece la obligatoriedad de realizar acción preventiva por parte del empresario para garantizar los derechos a la protección eficaz de los trabajadores, como se manifiesta en el artículo 14 de la misma Ley.

La ley 31/1995 se desarrolla para las obras de construcción en el RD 1627/1997, de 24 de Octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción, que en su artículo cuarto indica como requerimiento obligatorio la elaboración de un estudio básico de seguridad y salud, que servirá, como se expone en su artículo séptimo, para que cada contratista elabore un plan de seguridad y salud en el trabajo en el que se analicen, estudien, desarrollen y complementen las previsiones contenidas en el estudio básico, en función de su propio sistema de ejecución de la obra.

Durante la fase de explotación, se debe llevar a cabo un estudio de seguridad industrial, para la identificación de los peligros asociados al proceso, y los posibles escenarios de accidentes.

### **2.2. Datos generales de obra**

El proyecto de obra tiene como objetivo la construcción de una planta de producción de butan-2-ona por deshidrogenación de butan-2-ol, emplazada en una parcela de uso industrial en el polígono industrial de Actividades Económicas de Arteixo (ACTECA) con una extensión de 17.400 m<sup>2</sup>, como se detalla en la memoria del proyecto.

La fase de obra cuenta con las siguientes tareas:

- Reconocimiento de la parcela por el contratista de obra, acompañada por la propiedad promotora del proyecto, o la dirección técnica de obra.
- Planificación de los trabajos a realizar.
- Obtención de las licencias de obra civil requeridas.
- Organización de la zona de obra: desbroce, movimientos de tierra, construcción de accesos.
- Desarrollo de los trabajos de construcción.

### **2.3. Análisis de riesgos derivados de las características del emplazamiento**

Las características asociadas al emplazamiento de la instalación pueden ser condicionantes para la seguridad y la salud de los trabajadores durante la fase de obra. Por ello, se van a estudiar las siguientes características de la parcela: accesos, propiedades colindantes y conducciones de utilidades públicas como agua, electricidad y gases.

#### **2.3.1. Accesos**

Los accesos deben señalizarse y adecuarse a la maquinaria que se vaya a emplear, a fin de evitar riesgos de cualquier tipo de accidente. El acceso a la zona de obra debe estar vallado y controlado para evitar el acceso de personal ajeno a la obra, y se deben colocar carteles que informen de la obra, y prohíban el acceso.

#### **2.3.2. Propiedades colindantes**

En el caso de la instalación de butan-2-ona, el riesgo derivado de las parcelas colindantes es mínimo ya que el polígono seleccionado ha entrado recientemente en venta, y todavía no se desarrollan actividades en las propiedades cercanas. Si durante la fase de obra comienzan obras en alguna de las propiedades cercanas, sería necesario revisar este apartado y actualizarlo con las previsiones necesarias para garantizar la seguridad.

#### **2.3.3. Conducciones de agua**

El principal riesgo que existe es la rotura de líneas de agua que atraviesen la parcela durante operaciones de excavación y cimentación, causando la emisión de grandes caudales de agua que desestabilicen el terreno o causen problemas con la instalación eléctrica.

Como medida preventiva se deben identificar todas las conducciones de aguas que atraviesen la parcela, y evaluar su posible desvío. En el caso de que no se puedan desviar, se debe señalar su localización y planificar la obra para evitar su rotura.

#### **2.3.4. Líneas eléctricas y de gas**

De forma similar a las conducciones de agua, las conducciones de líneas eléctricas y de gas enterradas que atraviesen la parcela pueden causar riesgos si se alcanzan en las operaciones de excavación, bien por electrocución o por asfixia y explosión, según el tipo.

Las medidas preventivas son análogas a las de las conducciones de agua, identificando las líneas en el período de planificación, y evaluando su posible desvío. Si no se pueden desviar, se señalarán adecuadamente, planificando la obra para evitar dañarlas.

#### **2.4. Análisis de riesgos en la fase de ejecución de obra**

En este apartado se identifican los principales riesgos intrínsecos asociados a las distintas operaciones de construcción que tienen lugar durante la ejecución de la obra. Las etapas a estudiar son: acondicionamiento del terreno, cimentación y levantamiento de estructuras, cubiertas y montajes ligeros, cierres, instalaciones auxiliares y acabados.

##### **2.4.1. Acondicionamiento del terreno**

En esta fase se realizan operaciones de desbroce, movimientos de tierra, excavaciones y acondicionamiento de accesos, que generan los siguientes riesgos sobre los trabajadores:

- Accidentes relacionados con el tráfico de vehículos y la operación de maquinaria pesada: atropellos, vuelcos, choques.
- Caídas en desnivel.
- Caída de materiales y objetos desde distintas alturas.
- Movimientos de tierras y proyecciones de polvo y grava.
- Ruido y vibraciones.
- Condiciones meteorológicas adversas agravantes del riesgo: escasa visibilidad, vientos, y superficies mojadas.

##### **2.4.2. Cimentación y levantamiento de estructuras**

Se lleva a cabo la cimentación y el levantamiento de las estructura principales, generando los siguientes riesgos:

- Caídas en desnivel.
- Caída de materiales y objetos desde distintas alturas.
- Proyecciones de grava, polvo y cemento.
- Accidentes relacionados con el tráfico de vehículos y la operación de maquinaria pesada.

- Accidentes relacionados con el trabajo con herramientas de corte y soldadura: abrasiones, cortes, quemaduras y contactos eléctricos.
- Hundimiento, caída o rotura de las estructuras y encofrados.
- Condiciones meteorológicas adversas agravantes del riesgo: escasa visibilidad, vientos, y superficies mojadas.

#### **2.4.3. Cubiertas, materiales ligeros y cierres**

Se destacan los siguientes riesgos:

- Caídas en desnivel
- Caídas de materiales y objetos a distintas alturas.
- Accidentes relacionados con el trabajo con herramientas de corte y soldadura: abrasiones, cortes, quemaduras y contactos eléctricos.
- Lesiones por sobreesfuerzo (hernias).
- Atrapamientos/aplastamientos por desprendimiento de estructuras o materiales alzados en grúa.
- Condiciones meteorológicas adversas agravantes del riesgo: escasa visibilidad, vientos, y superficies mojadas.

#### **2.4.4. Instalaciones auxiliares y acabados**

En esta fase se instalan la fontanería, líneas eléctricas y circuitos de calefacción y acondicionamiento de aire, así como operaciones de pintura, carpintería metálica, vidriería y alicatado. Se destacan los siguientes riesgos:

- Caídas en desnivel.
- Caídas de materiales y objetos a distintas alturas.
- Accidentes relacionados con herramientas de corte y soldadura: abrasiones, quemaduras y contactos eléctricos.
- Contactos eléctricos directos e indirectos.
- Aspiración de vapores de productos disolventes.
- Lesiones por sobreesfuerzos.
- Explosiones e incendios.
- Trabajo en atmosferas con presencia de material particulado o pobres en oxígeno.
- Atrapamiento, trabajos en espacios reducidos.

## **2.5. Medidas de protección colectiva**

En este apartado se indican las medidas de prevención y protección contra los riesgos laborales identificados en el apartado anterior. El objetivo es minimizar el riesgo de accidente, y mitigar las consecuencias en el caso de que ocurra. Para cada uno de los subapartados del apartado 2.4, se proponen las siguientes medidas:

### **2.5.1. Acondicionamiento del terreno**

- Realización de un estudio geotécnico para conocer las características del terreno, que permita la planificación adecuada de las labores de movimiento de tierras.
- Señalización y delimitación de las zanjas y otras diferencias de altura para evitar caídas.
- Definir, marcar y delimitar las zonas de tránsito de vehículos y maquinaria pesada.
- Uso de sistemas de contención para evitar los movimientos súbitos de tierra.
- Localizar las canalizaciones subterráneas de las utilidades públicas (agua, electricidad y gas natural).

### **2.5.2. Cimentación y levantamiento de estructuras**

- Se instalarán aquellos elementos que sean necesarios para garantizar la seguridad de los operarios durante la obra: barandillas, andamios, redes etc.
- Los andamiajes y otras estructuras temporales estarán proyectados por un técnico competente, que debe estar presente durante el montaje y el desmontaje de las mismas.
- Se debe mantener la zona de trabajo limpia y ordenada, correctamente iluminada, y protegida de las condiciones meteorológicas en lo posible.

### **2.5.3. Cubiertas, materiales ligeros y cierres**

Las condiciones de riesgo son análogas a las de las del apartado 2.5.2, por lo que las medidas a adoptar serán análogas

Se prestará una especial atención a los trabajos en altura, que serán realizados por personal cualificado que cuente con material de retención homologado, así como a los riesgos de aplastamiento y atrapamiento derivados del manejo de materia con grúas. Se establecerán protocolos de operación para minimizar el riesgo.

#### **2.5.4. Instalaciones auxiliares y acabados**

Las medidas a adoptar son análogas a las indicadas en los apartados 2.5.2 y 2.5.3, prestando especial atención al buen estado de las herramientas y a los protocolos de uso seguro de las mismas.

#### **2.6. Equipos de protección individual**

Sobre la capa de protección establecida por las medidas de protección colectiva indicadas en el apartado 2.5 es necesario añadir una segunda capa contra los riesgos individuales derivados del trabajo de cada operario. Para ello, se incorporan los Equipos de Protección Individual, en adelante identificados como EPIs.

El apartado se realiza conforme al RD 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. En su artículo primero se define como EPI “cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar su seguridad o su salud, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin”.

El RD 773/1997 constituye la transposición a la legislación española de la directiva del consejo europeo 89/656/CEE, de 30 de noviembre de 1989, relativa a las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. Los equipos de protección individual deben estar poseer la Certificación Obligatoria de los Equipos de Protección Individual, conforme al RD 1407/1992, de 20 de noviembre, por el que se regulan las condiciones para la comercialización y libre circulación intracomunitaria de los Equipos de Protección Individual. [4]

La selección de los EPIs requeridos se realiza de acuerdo al artículo sexto de la Guía Técnica para la Utilización por los Trabajadores de Equipos de Protección individual [5]. En él se indica el siguiente procedimiento de selección:

- Analizar y evaluar los riesgos existentes que no puedan evitarse o limitarse de forma suficiente por otros medios. Realizado en el apartado 2.4 del presente documento.
- Definir las características que deberán reunir los equipos de protección individual para garantizar su función, teniendo en cuenta la naturaleza y magnitud de los riesgos de los que deban proteger, así como los factores adicionales de riesgo que puedan constituir los propios equipos de protección individual o su utilización
- Comparar las características que se han establecido en el apartado anterior con la de los equipos disponibles en el mercado.

La selección de los EPIs a utilizar en la obra se realizará con la información expuesta en el apartado 2.4 y los Anexos I y III de la Guía Técnica [5]:

#### **2.6.1. Protectores de la cabeza (protectores del cráneo)**

Se utilizarán cascos protectores, recomendados en el Anexo III de la Guía Técnica para obras de construcción, especialmente en actividades con andamios y puestos en altura, obras de encofrado, montaje e instalación, entre otros. El Anexo I identifica como otros EPIs de protección de la cabeza los cascos de protección contra choques e impactos, prendas de protección para la cabeza y cascos para usos especiales; que podría utilizarse de forma adicional si se estima necesario.

#### **2.6.2. Protección del pie**

En el Anexo III de la Guía Técnica se recomienda en uso de calzado de protección y seguridad para las actividades a desarrollar en la obra, y en el caso de los trabajos en altura (obras de techado), la utilización de zapato de seguridad con tacón o suela corrida y suela antiperforante.

#### **2.6.3. Protección ocular**

De Anexo III se seleccionan los siguientes EPIs: pantallas faciales para los trabajos de soldadura y gafas de protección (de montura universal, integral o de tipo cazoleta) para el resto de operaciones de obra en las que pueda haber proyecciones de partículas o virutas, especialmente al manejar herramientas de corte y abrasión.

#### **2.6.4. Protección respiratoria**

Se utilizarán únicamente si se identifican riesgos por presencia de material particulado en el aire, intoxicación con gases, ausencia de oxígeno, como puede ser el caso de las operaciones de pintura en locales no ventilados. Según el tipo de riesgo se utilizarán equipos filtrantes de partículas, de gases y vapores, mixtos, o aparatos aislantes con suministro de aire.

#### **2.6.5. Protección del oído**

Se requerirá el uso de protectores del oído en trabajos con maquinaria neumática, trabajos de percusión, y trabajos con maquinaria pesada. Según el caso, se utilizarán protectores auditivos tipo tapón, tipo orejera o cascos antirruído.

#### **2.6.6. Protección del tronco, los brazos y las manos**

Se distinguen varias categorías: prendas de protección de forma genérica, mandiles antiperforantes, guantes y guantes de metal trenzado/malla metálica.

En el caso de la obra, se requerirá el uso de guantes en las operaciones de soldadura y manejo de cubiertas y vidrios planos, y cinturones sujeción del tronco para el manejo manual de pesos.

#### **2.6.7. Otros**

En este subapartado se incluye la ropa de protección para el mal tiempo, en caso de tiempo lluvioso y frío, y la ropa de señalización de seguridad. En caso de mal tiempo se debe suministrar ropa de protección contra el frío, y de forma general, chalecos retroreflectantes para mejorar la visibilidad.

#### **2.7. Señalización**

Los riesgos, y las medidas de protección individuales identificados en los apartados anteriores deben transmitirse al personal de obra y a los individuos ajenos a la misma por medio de la señalización adecuada, según lo dispuesto en el RD 457/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo, que en su artículo 4, apartado a, expone la necesidad de llamar la atención de los trabajadores sobre la existencia de determinados riesgos, prohibiciones u obligaciones.

En el anexo III de dicho decreto se indican las señales de advertencia (triangular, en negro sobre fondo amarillo), de prohibición (redonda, en rojo sobre fondo blanco, con banda roja atravesándola) y de obligación (redonda, en blanco sobre fondo azul). Se seleccionaran las de advertencias correspondientes a los peligros identificados, las de prohibición, aplicadas a los trabajadores y personal ajeno a la obra, y las de obligación, que indicarán los EPIs requeridos en la zona señalizada.

#### **2.8. Trabajos posteriores**

El RD 1627/1997 establece en su artículo sexto, apartado tercero, la necesidad de que el estudio básico de seguridad y salud contemple las previsiones y las informaciones útiles para efectuar en las debidas condiciones de seguridad y salud, los previsibles trabajos posteriores. En el caso de la planta de butan-2-ona, los trabajos posteriores a contemplar son: posibles reformas, mantenimiento de la obra civil, y el desmantelamiento de la instalación.

A los riesgos y medidas a adoptar durante el desmantelamiento se ha hecho referencia explícita en los apartados anteriores, y a los casos de reforma y mantenimiento se aplican de forma análoga las medidas expuestas en los apartados 2.4 y 2.5.

## **2.9. Obligaciones de los agentes involucrados en la obra**

Las distintas partes que se implican en la obra tienen una serie de obligaciones definidas por la legislación. En el RD 1627/1997 se exponen las obligaciones generales en materia de seguridad laboral, mientras que en el RD 1215/1997 se indican las relativas a la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo; por último, el RD 773/1997 recoge las relativas a la utilización por los trabajadores de los equipos de protección individual, que se pueden encontrar resumidos en la Guía Técnica [5].

### **2.9.1. Obligaciones del promotor**

En el RD 1627/1997 se define como promotor “cualquier persona física y jurídica por cuenta de la cual se realice una obra”. En el artículo tercero, se determina como obligación del promotor designar a un coordinador en materia de seguridad y salud tanto para la fase de elaboración del proyecto (siempre que intervengan varios proyectistas), como para la fase de obra (siempre que intervengan varias empresas o trabajadores autónomos).

### **2.9.2. Obligaciones del coordinador en materia de seguridad y salud**

Entre las aplicables de forma general a la obra, del RD 1627/1997, se destacan:

- Coordinar la aplicación de los principios generales de prevención y de seguridad
- Coordinar las actividades de la obra para garantizar que los contratistas, y en su caso, los subcontratistas y los trabajadores autónomos apliquen de manera coherente y responsable los principios de la acción preventiva.
- Aprobar el plan de seguridad y salud, elaborado por el contratista.
- Organizar la coordinación de las actividades empresariales.
- Coordinar las acciones y funciones de control de la aplicación correcta de los métodos de trabajo.
- Adoptar las medidas necesarias para que solo las personas autorizadas puedan acceder a la obra.

### **2.9.3. Obligaciones del empresario**

En lo relativo a los EPIs, como se indica en el artículo tercero de la Guía Técnica [5], el empresario estará obligado a:

- Determinar los puestos de trabajo en los que deba recurrirse a la protección individual, y precisar para cada uno de los puestos los riesgos contra los que se debe ofrecer protección, y el tipo de equipos de protección individual que deberán utilizarse.

- Elegir los equipos de protección individual conforme a lo expuesto en los artículos quinto y sexto del RD 773/1997, manteniendo disponible la información pertinente a ese respecto, y facilitando la información acerca de cada equipo.

Y las obligaciones generales en lo relativo a la utilización por parte de los trabajadores de los equipos de trabajo, según lo expuesto en el artículo tercero del RD 1215/1997:

- Adoptar las medidas necesarias para que los equipos de trabajo puestos a disposición de los trabajadores sean adecuados al trabajo que deba realizarse y convenientemente adaptados al mismo, de forma que garanticen la seguridad y la salud de los trabajadores al utilizar dichos equipos.
- Tener en cuenta para la selección de los equipos los factores expuestos en el apartado segundo del artículo tercero del RD 1215/1997.
- Tener en cuenta los principios ergonómicos, especialmente en lo relativo al diseño del puesto de trabajo y posición de los trabajadores durante la utilización del equipo de trabajo
- Adoptar las medidas necesarias para asegurar un mantenimiento adecuado de los equipos, de forma que estos se satisfagan los requisitos expuestos en el apartado primero del Real Decreto.

#### **2.9.4. Obligaciones de los contratistas y subcontratistas**

Las obligaciones de forma general durante la fase de obra, indicadas en el artículo 11 del RD 1627/1997, son:

- Aplicar los principios de la acción preventiva que se recogen en el artículo 15 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, en particular al desarrollar las tareas o actividades indicadas en el artículo 10 del presente Real Decreto.
- Cumplir y hacer cumplir a su personal lo establecido en el plan de seguridad y salud.
- Cumplir la normativa en materia de prevención de riesgos laborales, teniendo en cuenta, en su caso, las obligaciones sobre coordinación de actividades empresariales.
- Informar y proporcionar las instrucciones adecuadas a los trabajadores autónomos sobre todas las medidas que hayan de adoptarse en lo que se refiere a su seguridad y salud en la obra
- Atender las indicaciones y cumplir las instrucciones del coordinador en materia de seguridad y de salud durante la ejecución de la obra o, en su caso, de la dirección facultativa

- Los contratistas y los subcontratistas serán responsables de la ejecución correcta de las medidas preventivas fijadas en el plan de seguridad y salud en lo relativo a las obligaciones que les correspondan a ellos directamente o, en su caso, a los trabajadores autónomos por ellos contratados.
- Las responsabilidades de los coordinadores, dirección facultativa y del promotor no eximirán de sus responsabilidades a los contratistas y subcontratistas.

#### **2.9.5. Obligaciones de los trabajadores autónomos**

Las obligaciones generales de los trabajadores autónomos durante la fase de obra se definen en el artículo decimosegundo del RD 1627/1997, y se destacan:

- Aplicar los principios de la acción preventiva.
- Cumplir las disposiciones mínimas de seguridad y salud.
- Cumplir las obligaciones en materia de prevención de riesgos.
- Ajustar su actuación en obra conforme a los deberes de coordinación de actividades empresariales.
- Utilizar equipos de trabajo que se ajuste a lo dispuesto en el RD 1215/1997.
- Atender las indicaciones y cumplir las instrucciones del coordinador en materia de seguridad y salud, o en su defecto, de la dirección facultativa.
- Cumplir lo establecido en el estudio básico de seguridad y salud.

#### **2.9.6. Obligaciones de los trabajadores**

En relación a los EPIs, como se indica en el apartado décimo de la Guía Técnica [5]:

- Utilizar y cuidar correctamente de los equipos de protección individual.
- Colocar el equipo de protección individual en el lugar indicado para ello después de su utilización.
- Informar de inmediato a su superior jerárquico de cualquier defecto, anomalía, o daño apreciado en el equipo de protección individual, que, a su juicio, pueda entrañar una pérdida de su eficacia protectora.

#### **2.10. Derechos de los trabajadores**

Se distinguen dos ámbitos relevantes al estudio básico: generales de aplicación durante la fase de obra, y relativos a los EPIs. Los primeros se encuentran en el capítulo tercero del RD 1627/1997, y se destacan:

- El derecho a la información de los trabajadores. Los contratistas y subcontratistas deben garantizar que los trabajadores reciban una información adecuada de todas las medidas que hayan de adoptarse en lo que se refiere a su seguridad y su salud en la obra. Dicha información deberá ser comprensible para los trabajadores afectados.
- El derecho a la consulta y la participación de los trabajadores o de sus representantes, según lo expuesto en el artículo decimosexto del RD 1627/2015

En lo relativo a los EPs, se reconoce el derecho a la consulta y participación de los trabajadores según lo expuesto en el artículo noveno del RD 773/1997.

### **2.11. Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo**

El artículo séptimo del RD 1627/1997 establece que en la aplicación del estudio básico de seguridad y salud, cada contratista elaborará un plan de seguridad y salud en el trabajo en el que se analicen, estudien, desarrollen y complementen las previsiones contenidas en el estudio o estudio básico, en función de su propio sistema de ejecución de la obra.

En dicho plan se incluirán, en su caso, las propuestas de medidas alternativas de prevención que el contratista proponga con la correspondiente justificación técnica, que no podrán implicar disminución de los niveles de protección previstos en el estudio o estudio básico.

El plan de seguridad y salud elaborado debe ser aprobado antes de la obra por el coordinador en materia de seguridad y salud durante la ejecución de la obra, y podrá ser modificado por el contratista durante el proceso de ejecución de la obra, en función de la evaluación de los trabajos y de las posibles incidencias o modificaciones que puedan surgir. El plan de seguridad y salud estará disponible para los responsables en materia de prevención y los representantes de los trabajadores en cada empresa, con el fin de que puedan presentar aquellas sugerencias y alternativas que consideren apropiadas.

### **2.12. Libro de incidencias**

El RD 1627/1997 establece en su artículo decimotercero la obligatoriedad de la existencia de un libro de incidencias (con hojas en duplicado) en cada centro de trabajo, cuya finalidad será el control y seguimiento del Plan de Seguridad y Salud.

El libro de incidencias será facilitado por el Colegio profesional al que pertenezca el técnico que haya aprobado el plan de seguridad y salud, o si se trata de una obra de las Administraciones Públicas, por la Oficina de Supervisión de Proyectos u órgano equivalente. Además, se deberá mantener siempre en la obra y estará en poder del coordinador en materia

de seguridad y salud durante la ejecución de la obra. Tendrán acceso a el: la dirección facultativa de la obra, los contratistas, subcontratistas y trabajadores autónomos, así como las personas con responsabilidades en materia de prevención de riesgos en las empresas que intervengan en la obra y los representantes de los trabajadores.

Cuando se realice una anotación en el libro de incidencias, el responsable en materia de seguridad y salud en la obra o en su defecto la dirección facultativa de la obra estarán en obligación de remitir, en un plazo de 24 horas, una copia a la Inspección de Trabajo y Seguridad Social de la provincia en la que se realice la obra (en el presente proyecto, a la provincia de A Coruña). También se deberá notifica al contratista afectado, y a los representantes de los trabajadores de este.

### **2.13. Paralización de los trabajos**

Según lo indicado en el artículo decimocuarto del RD 1627/1997, cuando el coordinador en materia de seguridad y salud o cualquier otra persona integrada en la dirección facultativa de la obra observase un incumplimiento de las medidas de seguridad y salud, se advertiría al contratista responsable, dejando constancia en el libro de incidencias. Adicionalmente, en circunstancias de riesgo grave e inminente para la seguridad y salud de los trabajos, se puede disponer la paralización de los trabajadores, o si fuese necesario, de la totalidad de la obra.

La persona que ordene la paralización de la obra debe dar cuenta a los efectos oportunos a: la Inspección de Trabajo y Seguridad Social correspondiente, a los contratistas y subcontratistas afectados y a los representantes de los trabajadores de estos últimos.

## Bibliografía

1. **European Comission.** *BREF in the Large Volume Organic Chemical Industry (Formal Working Draft)*. 2017.
2. **Agencia Estatal de Meteorología.** Valores Climatológico Normales: A Coruña. [En línea] 2010. [Citado el: 10 de Junio de 2017.] <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=1387&k=gal>.
3. **Xunta de Galicia: Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio.** *Informe Resumo Calidade de Aire de Galicia no Período 1/1/2016 a 31/12/2017*. 2016.
4. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.** Equipos de Protección Individual y Colectiva. [En línea] Fecha no disponible. [Citado el: 12 de Junio de 2017.] <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.1f1a3bc79ab34c578c2e8884060961ca/?vgnextoid=70ab69d0d3819110VgnVCM1000000705350aRCRD&vgnnextchannel=1d19bf04b6a03110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>.
5. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.** *Guía Técnica para la Utilización por los Trabajadores de Equipos de Protección Individual*. 2012.

Planta de Producción de Butan-2-ona

## **DOCUMENTO IV**

# **Pliego de condiciones**

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

*Universidade de Santiago de Compostela*

*Escola Técnica Superior de Enxeñaría*

Septiembre 2017

Pablo Otero Jorge

## Índice

1.	Disposiciones generales .....	5
1.1.	Objeto del pliego .....	5
1.2.	Concurso.....	5
1.3.	Contrato .....	6
1.4.	Programa.....	7
1.5.	Documentación técnica.....	8
1.6.	Pliegos, instrucciones y normas aplicables .....	9
1.7.	Seguridad y accidentes laborales .....	9
2.	Calidad de los materiales .....	10
2.1.	Consideraciones generales.....	10
2.2.	Aceros.....	11
2.3.	Resto de materiales.....	11
3.	Normas de cálculo .....	11
4.	Disposiciones generales de las obras .....	12
4.1.	Plazo de ejecución.....	12
4.2.	Mano de obra .....	12
4.3.	Reforma del proyecto.....	13
4.4.	Contrataciones, omisiones o errores en los documentos.....	14
4.5.	Trabajos defectuosos o no autorizados .....	14
4.6.	Suspensión de las obras .....	14
4.7.	Seguros.....	16
5.	Ensayos, pruebas y protecciones .....	16
5.1.	Ensayos en taller .....	16
5.2.	Presentación en taller .....	16
5.3.	Protección contra la corrosión .....	16
6.	Fabricación, montaje, recepción y garantías .....	17
6.1.	Inspección fabril .....	17

## Documento IV: Pliego de Condiciones

6.2.	Montaje e inspección .....	17
6.3.	Controles .....	18
6.4.	Acta de fin de montaje .....	19
6.5.	Ajustes, ensayos y servicio experimental.....	19
6.6.	Recepción provisional .....	20
6.7.	Período de garantía .....	20
6.8.	Recepción definitiva .....	21
7.	Almacenamiento, seguros y transporte .....	21
7.1.	Almacenamiento .....	21
7.2.	Transporte .....	22
7.3.	Seguros.....	22
7.4.	Materiales y Equipos importados .....	23
8.	Organización de las obras .....	23
8.1.	Dirección de las obras y representantes del Adjudicatario.....	23
8.2.	Terrenos necesarios para la ejecución de obras .....	24
8.3.	Instalaciones auxiliares.....	25
8.4.	Relaciones entre la propiedad y los diversos contratistas .....	26
8.5.	Subcontratación de obras .....	27
8.6.	Personal de montaje .....	28
8.7.	Seguros y asistencia médica.....	29
9.	Condiciones de pago y legislación.....	29
9.1.	Definición de precios.....	29
9.2.	Prestaciones accesorias y trabajos por administración .....	30
9.3.	Trabajos no previstos .....	31
9.4.	Revisión de precios.....	32
9.5.	Condiciones de pago .....	33
9.6.	Penalizaciones .....	33
9.7.	Indemnizaciones a favor del Adjudicatario .....	34

9.8. Cese o aplazamiento de los trabajos, rescisión del contrato..... 34

## **1. Disposiciones generales**

### **1.1. Objeto del pliego**

El presente Pliego de Condiciones constituye en conjunto de instrucciones, normas, prescripciones y especificaciones que, junto con lo indicado en el resto de partes del proyecto, definen todos los requerimientos a cumplir por las obras.

En el Pliego se incluyen: las condiciones que deben cumplir los materiales y las instrucciones para la ejecución, medición y abono de las unidades de dichas obras. Constituye la guía a seguir por el adjudicatario durante toda la fase de obra.

### **1.2. Concurso**

La Propiedad invitará a concurso restringido a aquellas empresas que juzgue oportunas, para el suministro de equipos, materiales y servicios especificados en el proyecto. La Propiedad se reservará el derecho a introducir modificaciones de detalle, o exigir la prestación de servicios o suministros adicionales que el Adjudicatario este en posición de realizar. Adicionalmente, el Adjudicatario podrá proponer modificaciones de las especificaciones del suministro, debiendo hacerlo siempre que lo juzgue técnica y económicamente aconsejable.

Como documento fundamental para la adjudicación del concurso, se tomará el Cuadro de Precios Unitarios presentados por las empresas invitadas. Adicionalmente, se presentara un Presupuesto Parcial y otro General, y una descripción de la organización de los trabajos a realizar, que debe incluir una relación del personal y los medios materiales disponibles. Del mismo modo, se indicaran las fechas límite en que los Concursantes deben recibir de la Propiedad la información complementaria que estimen necesaria para poder realizar sus trabajos de forma acorde al plan previsto.

No se considerará válida ninguna oferta que se presente fuera del plazo establecido, o que no cuente con todos los documentos. La Propiedad notificará a los Concursantes del resultado del concurso, y si uno de los concursantes no recibiese notificación dentro del plazo establecido, podría presentar su renuncia a la Propiedad.

El Concursante seleccionado, en adelante denominado Adjudicatario, recibirá comunicación de la concesión de los trabajos por parte de la Propiedad, y estos comenzarán en la fecha fijada en el plan de obra. Entre la fecha de resolución del concurso, y el comienzo de las obras, se deberá formalizar entre la Propiedad y el Adjudicatario el contrato correspondiente, que se detalla en el siguiente apartado.

### **1.3. Contrato**

La Propiedad y el Adjudicatario formalizarán el contrato de obra tras la resolución del concurso, y el Adjudicatario estará obligado a la cumplimentación de la legislación de carácter social y técnico que sea de aplicación al trabajo correspondiente. Correrán a cargo del Adjudicatario los gastos fiscales y de otro tipo a los que dé lugar la formalización del contrato.

El Adjudicatario es el responsable de la totalidad de los suministros y servicios que se especifiquen en el contrato, en estricto cumplimiento de las disposiciones contractuales y de las normas técnicas de aplicación. Como consecuencia, serán responsabilidad suya las modificaciones, reparaciones y sustituciones, así como las indemnizaciones justificadas correspondientes a los perjuicios causados por deficiencias, errores o atrasos laborales que impidan el exacto cumplimiento del contrato.

En caso de incumplimiento, la Propiedad se reserva el derecho de suspender los pagos al Adjudicatario y pedir indemnizaciones de acuerdo con lo establecido en el contrato.

La Propiedad podrá hacerse representar frente al Adjudicatario mediante consultores u otras entidades expertas elegidas para colaborar en los estudios, fabricación, montaje y ensayos. Análogamente, el Adjudicatario designará a un representante, siempre con el acuerdo de la propiedad; que deberá estar presente durante el período de montaje, siendo el responsable del equipo del Adjudicatario. Adicionalmente, el Adjudicatario deberá estar presente en las reuniones convocadas por la Propiedad, en el lugar de obra u otro, por personal técnico cualificado, para lo cual la Propiedad respetará un período de notificación adecuado.

El adjudicatario deberá designar de acuerdo con la Propiedad a la lista de proveedores y empresas colaboradoras, que no podrá ser modificada por el Adjudicatario sin la aprobación de la Propiedad. La aprobación de la lista no eximirá en ningún caso al Adjudicatario del cumplimiento de sus obligaciones contractuales. Adicionalmente, el Adjudicatario no podrá ceder ni traspasar a terceros ninguna de sus obligaciones contractuales ni utilizar en la ejecución de los trabajos a otras empresas que no figuren en la lista aceptada por la propiedad.

En el caso de que el Adjudicatario incumpliese alguna de las previsiones indicadas, la Propiedad aplicará las sanciones que crea oportunas, llegando incluso a la rescisión del contrato si se considerase necesario. El adjudicatario es el plenamente responsable del contrato frente a la Propiedad, personal obrero y terceros.

La Propiedad podrá determinar una fianza inicial y una serie de retenciones de garantía, que serán retenidas por la Propiedad si se produjese la rescisión del contrato, o el abandono de los trabajos por causas imputables al Adjudicatario. El Adjudicatario es responsable además de los medios auxiliares, maquinaria y materiales depositados en la obra, que no podrán ser retirados de la misma sin autorización escrita de la Propiedad.

El adjudicatario es el único responsable de la correcta ejecución técnica de las obras, sin derecho a indemnización alguna por sobrecostes, falsas operaciones, o modificaciones que la dirección facultativa tenga a bien marcar.

#### **1.4. Programa**

El Adjudicatario deberá presentar junto con la propuesta un programa general de los trabajos (estudios, aprovisionamiento, fabricación, transporte, montaje y ensayos), que debe ser desarrollado en un grado superior de detalle, en el que se indicaran las fechas de inicio y conclusión de cada uno de los trabajos señalados en el programa inicial, así como una fecha intermedia cuyo incumplimiento de lugar a la aplicación de penalidades. La Propiedad establecerá un plazo de presentación del programa detalla, que comenzará tras la fecha de adjudicación.

El programa deberá incluir además las fechas límite para la recepción de los suministros para asegurar la continuidad de los distintos trabajos, así como los datos referentes a los trabajos realizados por terceros (de entre la lista de empresas acordadas por el Adjudicatario y la Propiedad).

La determinación del orden de realización de los trabajos será facultad del Adjudicatario, salvo en el que caso de que existan razones técnicas para introducir una modificación. Todos los trabajos se ejecutarán de acuerdo al proyecto, y a las modificaciones aprobadas del mismo. El adjudicatario seguirá las instrucciones del ingeniero director de obra, siempre dentro de lo estipulado por el contrato.

El programa de los trabajos no podrá ser modificado por el Adjudicatario sin la conformidad de la Propiedad, y el Adjudicatario deberá priorizar las alteraciones del programa propuestas por la Propiedad.

El Adjudicatario se compromete a dar comienzo a las obras dentro del plazo marcado, desarrollándolas de forma que se cumplan los plazos intermedios, y la finalización de la obra tenga lugar dentro del plazo exigido en el contrato. El Adjudicatario notificará por escrito a la Propiedad el comienzo de las obras.

Si los trabajos no se ajustan a los plazos establecidos por el contrato, el Adjudicatario incurrirá en las penalizaciones establecidas. Si el retraso se produce por motivos ajenos al control de Adjudicatario, este podrá solicitar una prórroga a la Propiedad, que será de duración inferior o igual al tiempo demorado. La propiedad establecerá una serie de plazos para la petición y resolución de la prórroga, que en caso de no ser respetados conllevarán la renuncia a la misma.

El Adjudicatario se compromete a desarrollar el programa con acuerdo a la legislación vigente, así como la que entre en efecto durante el plazo de ejecución de la obra, incluyendo aquella relativa a los accidentes de trabajo.

### **1.5. Documentación técnica**

El Adjudicatario recibirá todos los datos y documentos de base necesarios para los estudios y proyectos, y debe solicitar a la Propiedad, con un plazo de antelación adecuado a la fecha de comienzo de las obras, toda la documentación complementaria y de detalle que estime necesaria.

Los documentos técnicos y contractuales entregados por la Propiedad al Adjudicatario deben ser cuidadosamente revisados por el mismo. En caso de errores u omisiones, este tendrá la obligación de proponer a la Propiedad las modificaciones convenientes para una buena ejecución.

El Adjudicatario deberá proporcionar a la Propiedad, en el plazo establecido, toda la documentación referente a los datos y condiciones de los materiales, planos y demás documentación técnica requerida. De esta forma la Propiedad podrá:

- Tener pleno conocimiento de los esfuerzos a los que está sometido el equipo, bajo diversas hipótesis de cálculo, y las garantías que ofrecen a este respecto los materiales y soldaduras; así como su funcionamiento, conservación y explotación.
- Efectuar la inspección de su fabricación y montaje.
- Estudiar y proyectar todos los trabajos que no sean responsabilidad de Adjudicatario.

Los documentos proporcionados por el Adjudicatario podrán estar en gallego, español o inglés. Los documentos podrán ser aceptados en portugués, francés o italiano; pero la propiedad se reserva el derecho a solicitar una traducción, que constituirá el documento válido a efectos de contrato.

La Propiedad comunicará al Adjudicatario, dentro de un plazo previamente establecido, la aprobación o modificaciones requeridas de los documentos presentados por el Adjudicatario a los que se hace referencia en este apartado. Se entenderá que se consideran aprobados si la Propiedad no realiza ningún comunicado durante el período establecido. Los documentos que la Propiedad considere necesario modificar serán revisados por el Adjudicatario, y remitidos para su aprobación en un plazo establecido. Todos los documentos, tanto los recibidos por la Propiedad del Adjudicatario como viceversa, pertenecen a la Propiedad, y el Adjudicatario no podrá publicarlos o comunicarlos a terceros sin la autorización escrita de la Propiedad.

Para cada uno de los equipos instalados, el Adjudicatario deberá proporcionar a la Propiedad al menos tres copias del manual de instrucciones, que deberán contener, como mínimo:

- Descripción del equipo
- Características nominales de diseño y prueba
- Composición y características de los materiales
- Principios de operación
- Instrucciones de operación
- Limitaciones máximas y funcionamiento en condiciones distintas a las nominales
- Lista de componentes, numerados e identificado, con dibujos de referencia y características.
- Instrucciones para el montaje y desmontaje, tolerancias.
- Pruebas y controles
- Lista de repuestos

### **1.6. Pliegos, instrucciones y normas aplicables**

Las prescripciones de las instrucciones y normas que se recogen en la legislación vigente, serán de aplicación con carácter general, y en todo aquello que no reduzca el alcance de las instrucciones que se incluyen en el presente Pliego de Condiciones, para los materiales y la ejecución de las obras

### **1.7. Seguridad y accidentes laborales**

El Adjudicatario está obligado al cumplimiento de la normativa en materia de seguridad laboral a la que se hace referencia en el Estudio Básico de Seguridad y Salud Laboral del presente proyecto, así como a cualquier otra norma vigente que sea de aplicación.

Todo el equipamiento utilizado por el Adjudicatario en la ejecución de la obra debe cumplir las máximas condiciones de seguridad, cumpliendo con toda la normativa vigente a tal efecto.

Igualmente, el personal del Adjudicatario estará obligado a la cumplimentación de toda la normativa vigente en materia de Seguridad y Salud Laboral, destacando la necesidad de la utilización de los Equipos de Protección Individual que hayan sido identificados como necesarios; con el fin de eliminar o reducir al máximo posible los riesgos profesionales. La Propiedad se reserva el derecho, por medio del director de obra, de suspender los trabajos o cesar de la obra a cualquier trabajador cuya conducta sea imprudente o temeraria, y por tanto sea susceptible de causar accidentes que ponga en peligro su propia seguridad o la de otros trabajadores, así como el adecuado desarrollo de las obras.

Toda la responsabilidad derivada de accidentes causados por el empleo de materiales defectuosos, imprudencias por parte de los trabajadores a cargo del Adjudicatario, o cualquier otro incumplimiento de las condiciones establecidas, recaerá sobre el Adjudicatario. Correrán de su cuenta todas las sanciones, tanto civiles como penales, derivadas de los daños que puedan causar los accidentes mencionados.

La Propiedad podrá solicitar al Adjudicatario los documentos que acrediten el haber formalizado los trabajos frente a la Seguridad Social, según las formas establecidas por la legislación.

## **2. Calidad de los materiales**

### **2.1. Consideraciones generales**

Todas las materias primas suministradas por el Adjudicatario, estén o no recogidas en el proyecto, deberán reunir las condiciones de calidad exigibles, que serán acordadas por la Propiedad y el Adjudicatario. La aceptación por la Propiedad de una marca, fábrica o lugar de extracción no exime al Adjudicatario de su responsabilidad.

El adjudicatario presentará muestras de los materiales para su inspección y aprobación por parte de la Propiedad. Sin esta aprobación no será posible proceder a su utilización y empleo, y la Propiedad podrá solicitar la retirada de material instalado que no haya sido aprobado. Los materiales rechazados deberán ser retirados de la obra por el Adjudicatario, o bien depositados en los lugares indicados.

En caso de que los materiales no cumplan con las especificaciones de calidad requerida, o no tuviesen la preparación exigida, o se demuestre que no son adecuados para su función, la

Propiedad notificará al Adjudicatario la necesidad de su reemplazo, que correrá a cuenta del mismo.

Los costes de transporte y colocación de los materiales correrán a cargo del Adjudicatario, y estos deberán almacenarse en el sitio de la obra de forma que no interfieran con el adecuado desarrollo de los trabajos. Los materiales de deshecho resultantes de los trabajos a cargo del Adjudicatario serán responsabilidad del mismo, que deberá asegurar su correcta eliminación.

## **2.2. Aceros**

El Adjudicatario deberá indicar el tipo de acero utilizado según una clasificación estándar, así como las características metálicas. Se utilizaran las siguientes geometrías:

- Piezas de acero moldeado.
- Estructuras de acero laminado.

## **2.3. Resto de materiales**

Para el resto de materiales empleados en la obra, el Adjudicatario deberá indicar las características mecánicas, composición y procedencia de los mismos.

## **3. Normas de cálculo**

Serán de aplicación las normas ISO y UNE u otras vigentes de rango similar, para el cálculo de estructuras y construcciones hidráulicas. El Adjudicatario deberá indicar las tensiones de trabajo, simples y compuestas a las que estén sometidos los materiales que compongan las estructuras. Asimismo, se identificarán las siguientes tensiones máximas admisibles como base para el cálculo:

- Tensión admisible de tracción o compresión.
- Tensiones admisibles en esfuerzos constantes.
- Tensión de comparación.

La tensión máxima admisible constituye un límite que no debe ser superado en ningún caso, incluyendo choques, esfuerzos dinámicos, vibraciones u oxidación. Se indicarán asimismo las cargas transmitidas a las cimentaciones de hormigón.

Las conducciones y los revestimientos se dimensionarán para las condiciones de carga más desfavorables previsibles. El Adjudicatario facilitará los cálculos completos de los elementos relevantes de la obra, incluyendo los coeficientes de seguridad para elementos como vigas, cadenas, cables, etc.

## **4. Disposiciones generales de las obras**

### **4.1. Plazo de ejecución**

Los plazos de ejecución, tanto parciales como totales, señalados en el contrato empezarán a contar tras la fecha de replanteo de la obra o desde la notificación de la Propiedad autorizando el comienzo de las mismas.

El Adjudicatario tendrá obligación de cumplir los plazos, que serán improrrogables a menos que las modificaciones solicitadas por el ingeniero director y aprobadas por la Propiedad influyan sobre los plazos del contrato.

Si por causas ajenas al control del Adjudicatario no se pudieran comenzar los trabajos en la fecha prevista, o tuviesen que ser suspendidos una vez iniciados, la Propiedad podrá conceder una prórroga cuya duración será la mínima necesaria.

### **4.2. Mano de obra**

El personal del Adjudicatario en los puestos de encargado, capataz, oficial, ayudante o peón debe ser cualificado y responsable, al igual que el de las empresas subcontratadas, y deberán respetar las instrucciones del director de obra.

El Adjudicatario deberá tener en la obra el número de operarios adecuado para asegurar el desarrollo adecuado de los trabajos que se estén ejecutando. Deberán ser profesionales experimentados en sus respectivos oficios, con aptitud reconocida, y dirigidas por una persona responsable del conjunto de la obra.

No se permitirá trabajar a ningún obrero que no esté debidamente capacitado, o que no respete la normativa de seguridad y salud. Si por omisión o desobediencia de las precauciones establecidas por el Estudio Básico de Seguridad y Salud se produjese un accidente laboral, la responsabilidad será del adjudicatario.

La dirección de obra podrá prohibir la permanencia en obra del personal de Adjudicatario que no cumpla las previsiones expuestas en el presente Pliego, y el Estudio Básico de Seguridad y Salud, comprometiendo la seguridad, y la marcha adecuada de los trabajos de obra. El Adjudicatario podrá recurrir la medida si considera que no hay motivos fundados.

La totalidad del personal de Adjudicatario y empresas subcontratadas debe estar debidamente afiliado a la Seguridad Social, y la documentación correspondiente debe estar en la oficina de obra. Además, el Adjudicatario debe cumplir con la legislación vigente en materia laboral.

El Adjudicatario, por sí mismo o por medio de sus técnicos, representantes o encargados deberá estar presente en la obra durante la jornada legal de trabajo. Además, deberá acompañar al Ingeniero director y otras personas delegadas por el mismo o por la Propiedad cuando hagan visitar a la obra, poniendo a su disposición los medios y documentos necesarios para la inspección. Asimismo, el Adjudicatario o su representante vigilarán las obras de colocación de andamios y otros medios auxiliares, y comprobará que los materiales utilizados tengan garantía de fabricación. Será responsable de los accidentes derivados de estas disposiciones.

El adjudicatario no podrá reclamar ni percibir indemnización por sustracción, pérdidas o averías ocurridas durante la obra. Será responsable de las pérdidas de material que se le entregase a su custodia, en cuyo caso le sería descontando el importe proporcional de las cantidades a percibir. Adicionalmente, será responsable de los daños a la vía pública o propiedades colindantes ocurridas durante la obra; deberá repararlas y dejarlas en su estado original.

#### **4.3. Reforma del proyecto**

Si durante el transcurso de las obras el Ingeniero Director estimase conveniente introducir modificaciones en el Proyecto, el Adjudicatario estará obligado a realizarlas, siempre dentro de las condiciones establecidas en el contrato y el pliego de condiciones.

No tendrá lugar variaciones del proyecto que no hayan sido autorizadas por el Ingeniero Director o la Propiedad.

Si antes de comenzar la obra la Propiedad, junto con el ingeniero director, decide ejecutar por sí misma parte de los trabajos contratados, o decidiese introducir modificaciones que aumentasen o redujesen, llegando a suprimir, parte de las cantidades indicadas en el Contrato, el Adjudicatario deberá respetar estas disposiciones, y no tendrá derecho a indemnización en concepto de la pérdida de beneficios por la no realización de los trabajos suprimidos. Siempre se deberá respetar un plazo de notificación al Adjudicatario adecuado.

En caso de la introducción de modificaciones que aumente la duración de los trabajos contratados, el Adjudicatario tendrá derecho a una prórroga del plazo de obra, siempre a juicio del ingeniero director.

#### **4.4. Contrataciones, omisiones o errores en los documentos**

El Pliego de Condiciones tiene prioridad sobre el resto de los documentos entregados al Adjudicatario. En caso de contradicción entre el resto de los documentos, y el Pliego, el Adjudicatario realizará lo indicado en el segundo. Adicionalmente, los datos omitidos en el resto de documentos e incluidos en el Pliego, o viceversa, se supondrán como presentes en ambos documentos, siempre que el trabajo quede lo suficientemente definido y aparezca en el presupuesto.

Los diversos apartados del Pliego de Condiciones son complementarios entre sí, entendiéndose que las prescripciones que contenga se aplican entre sí. Las contradicciones o dudas entre sus prescripciones serán resueltas por el Ingeniero Director o la Propiedad.

#### **4.5. Trabajos defectuosos o no autorizados**

Cuando el Ingeniero Director o alguno de sus representantes advierta defectos en los trabajos efectuados o que los materiales empleados o los equipos instalados no cumplan las condiciones acordadas, ya sea durante el desarrollo de los trabajos de obra o tras su finalización, y antes de la verificación definitiva de la obra, se podrá disponer a la eliminación y reconstrucción según el contrato, a expensas del Adjudicatario. Si este se negase a la reparación, se procederá según los siguientes pasos:

- Cuando los materiales o aparatos no fuesen de la calidad requerida o no estuviese adecuadamente preparados, el ingeniero director dará orden al Adjudicatario para que los reemplace por otros que se ajusten a las condiciones requeridos.
- El ingeniero director podrá, si las circunstancias o el estado de la obra lo aconsejan, permitir el empleo de aquellos materiales defectuosos que no causen problemas de seguridad. En el caso de que no sea aceptable, el Adjudicatario deberá substituirlos materiales de calidad igual o superior a la requerida, corriendo de su cuenta todos los gastos, y sin derecho a indemnización.

El Adjudicatario es el responsable último de los trabajos presentados en el contrato, y por tanto de los fallos o defectos causados por una ejecución deficiente, o por el uso de materiales de calidad inferior, aun en el caso de que el ingeniero director o sus representantes no le hayan llamado la atención sobre ello.

#### **4.6. Suspensión de las obras**

Para la suspensión de las obras la Propiedad tendrá que notificar al Adjudicatario con un plazo de antelación adecuado. El Adjudicatario deberá suspender los trabajos sin derecho a

indemnización, pero se le abonará el importe de la obra ejecutada, más el valor de los materiales acumulados en el sitio de la obra al precio de mercado. Esta disposición es igualmente válida para el caso de rescisión justificada del contrato.

Si la suspensión de las obras fuese motivada por el Adjudicatario, la Propiedad se reserva el derecho a la rescisión del contrato, abonando al Adjudicatario la cantidad correspondiente a los trabajos ejecutados. El Adjudicatario será responsable de los perjuicios causados que no se cubran con las indemnizaciones dispuestas.

En caso de quiebra del Adjudicatario, quedará rescindido el contrato, sin derecho a indemnización por parte del Adjudicatario o compañías acreedoras.

Tanto en el caso de rescisión como en otros que se enumeran a continuación, el Adjudicatario tendrá la obligación de recoger las herramientas y demás elementos de trabajo en un plazo que será acordado con la Propiedad. En caso contrario, se entenderá que los abandona en favor de la Propiedad. Son casos de rescisión los siguientes:

- No ejecutar las obras o modificaciones de las mismas con arreglo al proyecto.
- No cumplir los plazos parciales y totales establecidos.
- El empleo de materiales de calidad deficiente, o con instalación incorrecta.
- Incapacidad del personal empleado, tanto técnico como de obra.
- Quiebra o suspensión de pagos del Adjudicatario.
- Suspensión de la obra comenzada
- No dar comienzo a la obra dentro del plazo establecido.
- Incumplimiento de las condiciones de contrato, con perjuicios sobre los intereses de la Propiedad.
- Terminación del plazo de ejecución de la obra sin haber completado las mismas.
- Abandono de la obra sin causa justificada.
- Quiebra del Adjudicatario.
- Alteraciones del contrato, con modificaciones substanciales del proyecto.
- Toda causa de fuerza mayor que obligue a suspender las obras indefinidamente.

Según el caso, la fianza podrá quedar a beneficio de la Propiedad, que además se reserva el derecho de continuar la obra, bien por si misma, bien contratando a otras entidades.

#### **4.7. Seguros**

El Adjudicatario deberá, antes del comienzo de la obra, facilitar a la Propiedad la documentación que acredite haber realizado las correspondientes afiliaciones al Seguro Social, y contratado las siguientes pólizas:

- Seguro de responsabilidad civil.
- Seguro de accidentes de trabajo.
- Seguro de automóviles, para aquellos que tengan acceso a la obra.
- Seguro para toda la maquinaria empleada.
- Seguro de incendios para las obras.

### **5. Ensayos, pruebas y protecciones**

#### **5.1. Ensayos en taller**

Las uniones soldadas de los equipos y estructuras se inspeccionarán mediante control radioscópico, en presencia de la Propiedad y el Adjudicatario, de acuerdo a los plazos fijados con anterioridad. Se comprobarán además probetas soldadas de los materiales a utilizar en la obra mediante ensayos mecánicos.

Para el caso de los tanques de almacenamiento se inspeccionará un porcentaje fijado según las normas internacionales de los cordones de soldadura.

Los aparatos hidráulicos o mecánicos se comprobarán a una presión superior de la de servicio, sin superar los límites de seguridad. No deben producirse fugas, deformaciones o defectos durante los ensayos. Las bombas deberán cumplir con las especificaciones indicadas en sus curvas características.

#### **5.2. Presentación en taller**

La propiedad podrá exigir la presentación completa de los distintos elementos del suministro para prever posibles problemas que pudieran presentarse durante la obra. Se comprobará el estado de los mismos.

#### **5.3. Protección contra la corrosión**

Las superficies de materiales oxidables deberán ir protegidos con distintos tipos de pinturas, en función de las condiciones ambientales de la instalación, así como su grado de exposición a las mismas. La selección del material y los recubrimientos de los equipos expuestos a sustancias corrosivas se hará de acuerdo a la severidad de las condiciones en proceso.

El Adjudicatario deberá proporcionar la protección más adecuada según su experiencia, que será aprobada por la propiedad. Esta protección deberá, como norma general, aplicarse a todos los metales oxidables, en especial a aquellos en contacto con sustancias corrosivas, agua o expuesto a la intemperie. La propiedad podrá decidir ejecutar por sí misma la totalidad o parte de los trabajos de protección, descontándose el importe equivalente del presupuesto establecido con el Adjudicatario.

## **6. Fabricación, montaje, recepción y garantías**

### **6.1. Inspección fabril**

La Propiedad se reserva el derecho a realizar de forma directa, o a través de un representante, la inspección de la fabricación de los equipos con vistas al cumplimiento de los estándares de calidad establecidos, y también de los plazos de entrega, tanto en las instalaciones del Adjudicatario, como en la de sus proveedores.

El Adjudicatario deberá por tanto garantizar el libre acceso a sus instalaciones de la Propiedad o de sus representantes, así como proporcionar la documentación u otros elementos requeridos para que estos puedan desarrollar su labor.

El Adjudicatario deberá informar a la Propiedad, con una antelación suficiente, de las fechas previstas para la recepción de materiales y la realización de ensayos, así como las principales operaciones de montaje; con el fin de que la Propiedad o sus representantes puedan asistir para realizar una inspección de las mismas. Independientemente de su presencia, el Adjudicatario deberá enviar por triplicado las memorias de los ensayos realizados.

### **6.2. Montaje e inspección**

Se deberá presentar para su aprobación una relación del personal técnico del Adjudicatario que se encargará de la ejecución de los montajes, indicando las funciones a realizar por cada uno de ellos, y acreditando su capacidad técnica. Si la Propiedad estima que el personal designado es insuficiente, este tendrá la obligación de incorporar a su plantilla los técnicos necesarios según el criterio de la propiedad.

La Propiedad podrá, en caso de no estar satisfecha con el desarrollo de las operaciones de montaje, recusar a cualquier miembro de la plantilla del Adjudicatario; que estará obligado a sustituirlo.

El Adjudicatario podrá cubrir mediante un seguro los materiales y equipos que utilice durante el montaje, que podrá ser ampliado a los daños causados a la Propiedad o a terceros por la

utilización de estos durante el desarrollo de la obras. Este seguro podrá ser señalado por la propiedad como obligatorio, en cuyo caso deberá ser válido hasta el fin de la obra.

El personal de la inspección de la Propiedad podrá ordenar la paralización de los trabajos que no se realicen según las obligaciones expuestas por el contrato y el pliego, que deberá notificarse por escrito.

El Adjudicatario deberá abonar los costes producidos por la sustitución de material averiado durante la obra, así como los gastos derivados de la importación o reexplotación de herramientas.

### **6.3. Controles**

El Adjudicatario deberá asegurar, por medio de controles apropiados, la buena calidad del material utilizado en la obra. Los controles estarán sometidos a la aprobación por la Propiedad, que podrá exigir, si lo considerase necesario, la realización de controles adicionales.

#### **6.3.1. Intercambiadores**

Antes de iniciar la fabricación de los intercambiadores, el Adjudicatario deberá presentar a la Propiedad los procedimientos de soldadura, así como la homologación de los soldadores que participen.

Se requerirá un examen visual, en el que se descartará la presencia de defectos de fabricación o transporte, y se realizarán los ensayos requeridos según la normativa.

#### **6.3.2. Tuberías**

Las tuberías deberán manejarse según procedimientos que eviten los impactos o deformaciones. Antes de su instalación se realizará un examen visual para descartar defectos.

Se recopilará la documentación relativa a la fabricación y testeado de las tuberías, que deberán incluir las principales características de las mismas: material, diámetro, espesor, presión de trabajo y fecha de fabricación.

#### **6.3.3. Columnas y recipientes a presión**

Se realizará la inspección visual de las unidades, asegurando que no presenten defectos superficiales de fabricación o causados durante el transporte.

Se deberá recopilar la documentación referente a la fabricación, pruebas y entrega de los equipos.

Los recipientes se identificarán mediante una placa situada junto a una de las bocas, en la que figure la designación comercial, número de registro y fabricación, presión de prueba, superficie exterior, capacidad, y fecha de las pruebas.

#### **6.3.4. Bombas**

Se inspeccionarán de forma visual antes del montaje. Después del mismo se comprobará que la instalación está completa, y que el sistema de lubricación está cargado de aceite.

Se verificará la correcta instalación del motor y de los componentes del sistema de limpieza y control: filtros, presostatos, válvulas de no retorno, refrigeración etc.

#### **6.3.5. Prueba hidráulica en taller**

La Propiedad puede solicitar, si lo considerase necesario, la realización de una prueba hidráulica de los equipos. La presión de prueba deberá ser superior a 1,5 veces la presión de diseño del recipiente.

Si las pruebas revelan defectos inadmisibles, como fugas o deformaciones de los equipos, el Adjudicatario deberá llevar a cabo la reparación o reconstrucción de los equipos según lo dispuesto por la propiedad. La pieza de equipamiento reparada deberá volver a someterse a prueba hidráulica.

#### **6.4. Acta de fin de montaje**

Tras finalizar la instalación, el Adjudicatario comunicará por escrito a la Propiedad que los equipos están listos para entrar en servicio. La propiedad procederá a la inspección general de los equipos, elaborándose un acta de montaje firmada por técnicos de ambas partes.

#### **6.5. Ajustes, ensayos y servicio experimental**

Tras finalizar el montaje, se realizarán ensayos y pruebas de servicio experimental, y los correspondientes ajustes para asegurar el funcionamiento según las condiciones establecidas.

La instrucción del personal de la Propiedad para la operación de los equipos instalados por el Adjudicatario se realizará durante este período.

La entrega de los equipos y materiales suministrados por el Adjudicatario a la Propiedad se realizará en la fecha de entrada en servicio, excepto en el caso de los equipos importados por la Propiedad se hará en la fecha de embarque de los mismos, aunque la garantía de los mismos será responsabilidad del Adjudicatario hasta su entrada en servicio.

### **6.6. Recepción provisional**

Simultáneamente a la entrada en operación del equipamiento, será elaborada un acta de recepción provisional, firmada por personal técnico del Adjudicatario y la Propiedad, y previa a los ensayos correspondientes. Si por motivos ajenos al Adjudicatario no pudiesen realizarse los ensayos de recepción, se abrirá un plazo acordado, al final del cual se considerará como realizada la recepción provisional. El Adjudicatario deberá realizar las pruebas correspondientes antes de la recepción definitiva.

Adicionalmente, se elaborará un acta de recepción de obras por triplicado, por parte de la dirección técnica de la obra, en la que se hará constar las deficiencias encontradas y el plazo para subsanarlas. Si las obras se encuentran en buen estado, con arreglo a lo expuesto en el contrato y el pliego de condiciones, se darán por recibidas, y comenzando el plazo de garantía acordado con el Adjudicatario.

Si las obras no se encuentran en estado de ser recibidas, se hará constar en el Acta, en la que se especificarán las instrucciones a enviar al Adjudicatario para reparar los defectos encontrados, fijando un plazo para la reparación tras el cual se realizará una nueva inspección de la obra. Los trabajos de recepción corren a cuenta del Adjudicatario, por lo que de no cumplirse lo establecido, se podrá dar por rescindido el contrato, con pérdida de la fianza.

### **6.7. Período de garantía**

La fecha del acta de recepción provisional, como se especifica en el apartado anterior, será el comienzo del período de garantía. El Adjudicatario podrá mantener a su plantilla en la obra, tomando las medidas necesarias expuestas por la Propiedad para no entorpecer otros trabajos.

Durante el período de garantía, el Adjudicatario substituirá aquellos materiales o equipos defectuosos, debido a errores de diseño, fabricación, transporte o montaje. Todas las substituciones y posibles obras de construcción deberán realizarse dentro de un plazo acordado con la Propiedad, y sin cargo para la misma.

El Adjudicatario no será eximido de sus responsabilidades de garantía por las inspecciones o ensayos del personal técnico de la Propiedad, incluyendo el período anterior a la recepción definitiva.

Todo material, pieza o equipo substituido durante el período de garantía, deberá cumplir con las condiciones de calidad exigidas, y contará con un período de garantía igual al del equipamiento que substituyendo, comenzando este desde la fecha de la substitución.

Si como consecuencia de errores o desperfectos imputables al Adjudicatario se produjese el paro total o parcial de la instalación durante el período de garantía, se añadirá al mismo la longitud de la parada.

### **6.8. Recepción definitiva**

Al finalizar el período de garantía se realizará una examinación general del equipo, y en caso de que resulte positiva, se procederá a la recepción definitiva del mismo, elaborándose un acta firmada por personal técnico de la Propiedad y el Adjudicatario.

Hasta que el representante de la Propiedad no haya aprobado la recepción definitiva de los trabajos, el Adjudicatario se hará cargo de roturas, robos de material, averías etc., siempre que sea imputable al Adjudicatario, incluyendo por operaciones ordenadas por la Propiedad y aprobadas por el Adjudicatario.

Si fuesen necesarias pruebas o ensayos de algún tipo para la recepción definitiva de algún elemento del equipamiento, el Adjudicatario será responsable de realizarlas, cargando con los gastos y el material requerido. Podrán hacerse recepciones definitivas parciales, si la Propiedad lo considera oportuno.

Una vez realizada la recepción definitiva de todo el material, cesa la garantía a cuenta del Adjudicatario.

## **7. Almacenamiento, seguros y transporte**

### **7.1. Almacenamiento**

La Propiedad indicará la capacidad de los almacenes o explanadas designadas para que el Adjudicatario pueda depositar los materiales requeridos para la obra, así como las fechas en las que podrá disponer de ellas.

El Adjudicatario no podrá, salvo con autorización de la Propiedad, almacenar materiales fuera de las zonas de acceso, especialmente en el caso que dificulten el desarrollo adecuado de los trabajos.

Los materiales deberán almacenarse de forma que se asegure la preservación de su calidad, que se comprobará previamente a su utilización.

Las superficies utilizadas como zonas de almacén deberán acondicionarse una vez finalizado el plazo designado para su utilización, de forma que recuperen su aspecto y utilidad original.

Los gastos asociados al almacenaje y vigilancia de los materiales serán a cargo del Adjudicatario.

### **7.2. Transporte**

Salvo indicación en contra por parte de la propiedad, será responsabilidad del Adjudicatario asegurar el transporte de los materiales de las fábricas o instalaciones de los proveedores a la zona de almacenamiento en obra, asegurando que no se producen desperfectos durante esta etapa.

El Adjudicatario no podrá realizar el transporte de materiales sin autorización de la Propiedad, teniendo en cuenta que:

- Se respetarán las fechas previstas para los trabajos.
- El escalonamiento de envíos se realizará en las fechas más favorables para el desarrollo de los trabajos.
- Se realizará la inspección de embalajes y otras condiciones del transporte.
- La Propiedad podrá participar para la resolución de los problemas de transporte derivados de volúmenes o pesos excesivos, cuando su resolución dependa de organismos estatales.

La aceptación de la Propiedad de los embalajes, acondicionamiento y medios de transporte no eximen al Adjudicatario de sus responsabilidades en relación con el transporte, ni con otras responsabilidades relacionadas con los materiales y equipos suministrados.

Los embalajes de los materiales y equipos enviados a la obra pasarán a ser propiedad de la Propiedad después de su utilización, aunque se podrá solicitar al Adjudicatario que realice la gestión de los mismos.

El Adjudicatario deberá proporcionar, directamente o por medio de terceros, una lista de embalajes, con los contenidos, pesos, dimensiones y marcas de los distintos envíos, que deberán estar identificados de forma sencilla y correcta.

### **7.3. Seguros**

Será responsabilidad del Adjudicatario el contratar seguros para los materiales y equipos en tránsito, a menos que la propiedad establezca lo contrario.

#### **7.4. Materiales y Equipos importados**

Los trámites aduaneros de materiales, piezas o equipos fabricados en el extranjero deberán ser realizados por el Adjudicatario en nombre de la Propiedad.

En el caso de que el Adjudicatario no pueda realizar los trámites necesarios para la importación, la Propiedad o sus representantes cualificados llevarán a cabo la tramitación, cuyos gastos correrán a cuenta del Adjudicatario.

El Adjudicatario deberá comunicar por escrito a la Propiedad una relación del equipamiento a importar, con sus correspondientes fabricantes, así como el peso, valor, procedencia y moneda de pago. Igualmente, deberá obtener la documentación necesaria para la realización de los trámites en aduanas, independientemente de que la Propiedad realice gestiones adicionales.

### **8. Organización de las obras**

#### **8.1. Dirección de las obras y representantes del Adjudicatario**

La dirección de las obras estará a cargo del personal técnico de la Propiedad, indicándosele al Adjudicatario el listado de personal responsable que serán sus interlocutoras, destacando el Ingeniero Director Técnico de la Obra, cuyas principales funciones son:

- Velar por el cumplimiento de las condiciones contractuales, exigiendo al Adjudicatario la subsanación de errores.
- Garantizar la ejecución de las obras con arreglo al proyecto aprobado, o a las modificaciones autorizadas por la Propiedad.
- Asegurar el cumplimiento del programa de obra, respetando los plazos totales y parciales.
- Definir aquellas condiciones técnicas que el pliego de condiciones deje a su decisión.
- Resolver aquellas cuestiones técnicas que puedan surgir durante la interpretación de la documentación suministrada al adjudicatario, siempre con arreglo a las condiciones contractuales.
- Estudiar aquellas situaciones que impidan el normal cumplimiento del contrato, o que exijan su modificación, transmitiendo a la Propiedad y el Adjudicatario las modificaciones pertinentes.
- Gestionar los trámites con administraciones y particulares para la obtención de los permisos y autorizaciones requeridos para la ejecución de las obras y ocupación de las propiedades afectadas por ellas.

- Asumir personalmente la dirección de los trabajos u operaciones en curso en casos de urgencia o gravedad, asumiendo las responsabilidades derivadas. En estos casos el Adjudicatario pondrá a su disposición el personal y material de la obra.
- Participar en las recepciones, tanto la provisional como la definitiva, y redactar las actas correspondientes a las mismas.

El Adjudicatario deberá prestar su máxima colaboración al ingeniero director, de forma que se garantice el adecuado desarrollo de las obras.

Antes de iniciar los trabajos de obra, el Adjudicatario deberá indicar a la Propiedad el nombre y cualificación de su representante frente a la misma, que actuará como Jefe de Montaje a efectos técnicos y económicos. Deberá contar con la autoridad suficiente para poder recibir y resolver las comunicaciones y ordenes de la Propiedad o el ingeniero director. El Jefe de Montaje o su representante deberán estar siempre disponibles en el sitio de la obra.

Al mismo tiempo, el Adjudicatario deberá presentar, para su aprobación por parte de la Propiedad, la relación de personal técnico que se ocupará de la ejecución de los montajes, indicando las tareas asignadas a cada uno de ellos.

La Propiedad podrá recusar al Jefe de Montaje o cualquier otro personal técnico designado por el Adjudicatario en la obra, tanto previamente como durante el desarrollo de los trabajos de obra, estando el Adjudicatario obligado a sustituirlo durante un plazo acordado con la Propiedad.

En caso de que la Propiedad considere que el personal técnico designado por el Adjudicatario sea insuficiente para el desarrollo adecuado de los trabajos de obra, este estará obligado a completar la plantilla según el criterio de la Propiedad.

## **8.2. Terrenos necesarios para la ejecución de obras**

La Propiedad indicará al Adjudicatario, por medio de planos y otra documentación entregada, los límites del terreno disponible para la ejecución de los trabajos de obra, así como los accesos a los mismos.

El Adjudicatario y su personal técnico deberán garantizar un conocimiento adecuado de los terrenos, los trabajos a realizar, la naturaleza y el estado de los terrenos y sus alrededores, los medios de acceso, las condiciones climáticas de la región y los emplazamientos reservados para las obras.

Será responsabilidad de la Propiedad entregar únicamente los terrenos que se indican en los planos entregados al Adjudicatario, que además definirán la zona de montaje. Si el Adjudicatario, por motivos de conveniencia, deseara disponer de terrenos adicionales para el desarrollo de los trabajos de obra, será su responsabilidad la adquisición de los mismos, así como la obtención de los permisos necesarios para utilizarlos. Todas estas operaciones deberán notificarse previamente a la Propiedad, que manifestará por escrito su conformidad.

El Adjudicatario será responsable de los daños que se puedan causar a las vías públicas u otras vías de acceso a los terrenos de obra, sean de particulares o de la propiedad. También deberá cumplir todas las limitaciones impuestas por la legislación, y solicitar los permisos de transportes especiales, etc. En conclusión, el Adjudicatario es responsable de los daños que se puedan causar como consecuencia de su actuación, sobre terceros y bienes muebles o inmuebles, así como de las reclamaciones derivadas de los mismos.

### **8.3. Instalaciones auxiliares**

El abastecimiento de energía eléctrica, agua y aire comprimido para la obra serán a cuenta del Adjudicatario, y el suministro deberá cumplir con la normativa vigente. La Propiedad podrá facilitar, en caso de disponer de los mismos, materiales y medios auxiliares que el Adjudicatario pudiese necesitar.

Serán responsabilidad del adjudicatario:

- Los medios para asegurar la vigilancia y la conservación del material almacenado en la obra.
- Los medios y materiales necesarios para la construcción, conservación, desmontaje, demolición y retirada, dentro del plazo establecido, de sus instalaciones en obra (oficinas, aseos, almacenes, etc.)
- Todas las herramientas y materiales necesarios para la ejecución de la obra, así como material de seguridad: andamios, escaleras, equipamiento eléctrico.
- Los materiales de consumo como electrodos, lubricantes y combustible.
- Los ensayos necesarios para garantizar la calidad de las materias primas y piezas de equipo utilizados.
- Los gastos necesarios para la tramitación de la documentación e inspecciones por parte de las administraciones públicas.

Las acciones realizadas en el lugar de obra por otros contratistas o suministradores de forma simultánea a los trabajos del Adjudicatario no eximirán a este de cumplir sus responsabilidades, establecidas en el contrato y el pliego de condiciones.

El Adjudicatario no tendrá derecho a presentar reclamaciones a la Propiedad por fallar en sus estimaciones iniciales de necesidades de material, o de la calidad de los mismos, obligando a aumentarlas para cumplir con los requerimientos expuestos en el contrato y en el Pliego de Condiciones. De cada nueva aportación de maquinaria o material se formalizará un anexo a la parte del contrato en la que figuren los materiales y útiles aportados inicialmente.

Cuando el Adjudicatario se vea obligado a disponer de material suplementario, bien por circunstancias imprevistas en el contrato o bien a causas de fuerza mayor debidamente comprobadas por la Propiedad, el material utilizado será abonado según los precios establecidos de común acuerdo entre el Adjudicatario y la Propiedad.

#### **8.4. Relaciones entre la propiedad y los diversos contratistas**

El Adjudicatario estará obligado a suministrar, en cualquier momento, toda la información relativa a los trabajos que este efectuando para ejecutar lo dispuesto en el contrato, y que puedan afectar a los trabajos de otros contratistas o suministradores. La Propiedad tendrá el derecho de dirimir las posibles incidencias causadas en trabajos simultáneos.

En ningún caso las peticiones de información por parte de la Propiedad al Adjudicatario supondrán una injerencia sobre la ejecución del contrato, ni eximirán al Adjudicatario de ninguna de sus responsabilidades para con la Propiedad. Las peticiones tendrán por tanto carácter únicamente informativo.

En todo caso, el Adjudicatario es el único responsable del ejercicio de las funciones contratadas.

Siempre que le sea requerido, el Adjudicatario o uno de sus representantes deberán presentarse en las oficinas de la Propiedad en la obra, de forma que no pueda imputarse a su ausencia los retrasos o suspensiones en el cumplimiento de las operaciones contratadas u otras órdenes de la Propiedad.

La coordinación de los trabajos del Adjudicatario con la de otros contratistas u otras entidades ajenas al contrato será competencia de la Propiedad, estando obligados tanto el Adjudicatario como el contratista a respetar las ordenes dispuestas por la misma.

Siempre que el Adjudicatario establezca contacto con otros contratistas de la propiedad para tratar asuntos relativos al desarrollo de las obras, se deberá enviar a la Propiedad copias de las comunicaciones y correspondencia realizada, así como de las decisiones tomadas durante los contactos. Las decisiones deberán ser aprobadas por escrito por la Propiedad. Si por consecuencia de los contactos descritos anteriormente surgiesen conflictos entre el Adjudicatario y el resto de los contratistas, el Adjudicatario solicitará una reunión con la Propiedad y la otra parte afectada. Se resolverán los conflictos de acuerdo a lo establecido en los contratos con las distintas partes y en el Pliego de Condiciones. Las reuniones de este tipo deberán solicitarse con un plazo de antelación adecuado.

La Propiedad, si lo juzgase necesario, convocará reuniones con el Adjudicatario y/o los otros contratistas con el objetivo de discutir y resolver, siempre de acuerdo a lo dispuesto en los contratos y el pliego de condiciones, los problemas resultantes de la coordinación de los trabajos simultáneos en la obra, de los causados por la ocupación sucesiva del mismo local de obra, o por la disponibilidad de materiales y medios de uso común.

Cuando varios contratistas o el Adjudicatario utilicen instalaciones generales de su propiedad, se pondrán de acuerdo sobre el uso suplementario y el reparto de los gastos correspondientes.

La propiedad deberá estar constantemente informada acerca de los acuerdos tomados entre los distintos contratistas o suministradores en el caso de producirse algún tipo de conflictos. En ningún caso deberá encontrarse la Propiedad en una situación en la que por falta de información se produzcan retrasos o alteraciones en el desarrollo del plan de obra.

Cuando varios contratistas o suministradores trabajen en la misma obra, cada uno de ellos será responsable por los daños o perjuicios causados por su actuación sobre los trabajos de los otros, la Propiedad, o la vía pública e instalaciones adyacentes.

### **8.5. Subcontratación de obras**

A menos que el contrato establezca lo contrario, o por sus condiciones y características se recomiende que la obra la ejecute directamente el Adjudicatario, este último podrá subcontratar a terceros la realización de distintas unidades de obra, cumpliendo siempre con los siguientes requisitos:

- Notificar por escrito al ingeniero director o su representante el subcontrato que se va a realizar, especificando las partes de la obra y condiciones económicas, de modo que este pueda realizar una autorización previa que se registrará por escrito.

- Que las unidades de obra subcontratadas por el Adjudicatario no excedan el 50% del valor económico del presupuesto total de la obra principal.

La subcontratación siempre estará supeditada a la autorización por escrito de la Propiedad.

En cualquier caso, la Propiedad nunca quedará vinculada, ni existirán relaciones contractuales entre la misma y los distintos subcontratistas, de forma que la subcontratación no exime al Adjudicatario de sus obligaciones con la Propiedad, dispuestas en el contrato y en el pliego de condiciones.

### **8.6. Personal de montaje**

Es competencia del Adjudicatario todo el personal, especializado y no especializado y auxiliar que se emplee para la dirección y ejecución de la obra, así como todos los gastos derivados del mismo personal (viajes, dietas, alojamiento, desplazamientos de alojamiento en obra y desplazamientos en la obra).

El Adjudicatario deberá asegurar que la documentación relativa al personal contratado esté en vigor con respecto a la legislación española. Si el Adjudicatario emplease a personal extranjero, será su responsabilidad la obtención de la documentación que permita su trabajo en la obra. El Adjudicatario deberá remitir esta documentación a la Propiedad antes del comienzo de la obra.

Todo el personal contratado, deberá acatar las leyes vigentes con respecto a los derechos del trabajador (horarios, seguros sociales, beneficios, etc.), y de igual forma el resto de la legislación en materia laboral que sea de aplicación.

El Adjudicatario deberá contar con personal técnico suficiente a pie de obra, de forma que exista un número suficiente de responsables para el trabajo que se esté realizando. Deberá igualmente acreditar frente a la Propiedad su competencia para la dirección de los trabajos mencionados.

El Adjudicatario es responsable de los fraudes, malversaciones u otros delitos cometidos por su personal en relación con el suministro o el empleo de los materiales.

El número de trabajadores en la obra será proporcional al trabajo a realizar, y se deberá certificar su competencia en los trabajos concretos que se vayan a realizar. Además, el número

de trabajadores deberá permitir cumplir con los plazos de obra totales y parciales establecidos en el contrato.

El Adjudicatario deberá proporcionar a la propiedad, siempre que esta lo solicite, una relación del personal presente en la obra, clasificado según la categoría profesional. Será responsabilidad suya mantener el orden y obligar a que los trabajadores respeten lo dispuesto en el pliego de condiciones. La Propiedad se reserva el derecho a retirar de la obra a cualquier operario contratado por el Adjudicatario que impida el adecuado desarrollo de los trabajos.

### **8.7. Seguros y asistencia médica**

El Adjudicatario no podrá comenzar las obras hasta que haya justificado a la propiedad el tener cubiertos los seguros por los accidentes de trabajo y enfermedades profesionales, con arreglo a la legislación vigente en materia laboral.

El Adjudicatario asegurará por sí mismo, o por medio de una compañía de seguros adecuada, la prestación de asistencia médica al personal en caso de enfermedad profesional o accidente.

El Adjudicatario será el responsable de las condiciones de seguridad de los trabajadores, estando obligado a adoptar y aplicar las disposiciones establecidas por la legislación vigente en materia de seguridad e higiene laboral, y las normas de seguridad correspondientes a los trabajos que se vayan a realizar.

Todos los contratistas que participen en la obra, junto con el Adjudicatario, deberán reunirse por indicación de la propiedad para constituir una Junta Central de Seguridad, en la que participen representantes técnicos de las distintas empresas. Esta Junta tendrá como objetivo coordinar las medidas de seguridad e higiene adoptadas por cada una de las empresas durante el desarrollo de los trabajos de obra.

## **9. Condiciones de pago y legislación**

### **9.1. Definición de precios**

Los gastos motivados por los bienes y servicios contratados serán expresados en euros, y cubrirán los costes de fabricación, suministro y montaje de todos los equipos, junto con su ensayo y puesta en funcionamiento. Adicionalmente, se cubrirán también todos los repuestos y servicios adicionales que se requieran.

Los gastos del establecimiento, desmontaje y retirada de las instalaciones en obra del Adjudicatario estarán incluidos en el precio del suministro.

El precio de los materiales y equipos que compongan el suministro englobarán:

- Coste en fábrica del Adjudicatario de los materiales y equipos, sea cual sea su procedencia, e incluyendo el embalaje adecuado.
- Coste del transporte de la fábrica a pie de obra, así como los movimientos de material en la propia obra.
- Coste del seguro de transporte.
- Coste unitario de las piezas de repuesto que se requieran.

En el precio de los materiales y equipos estarán incluidos, adicionalmente, los costes de los estudios de fabricación, incluyendo planos mecánicos, esquemas eléctricos etc., así como los derechos de patentes y otros trámites que puedan repercutir sobre los mismos. Se garantiza a la Propiedad que no existen terceros sobre los derechos de patente y explotación.

El precio del transporte incluirá cargas, descargas, transbordos, colocación en parque o almacén y gastos de vigilancia, y los gastos correspondientes a los derechos aduaneros y permisos de importación.

El coste de montaje incluirá los gastos de instrucción y adiestramiento del personal de la Propiedad que se hará cargo de la operación de las instalaciones, el precio de los seguros de montaje y los ensayos de los equipos e instalaciones, de acuerdo con lo establecido en el pliego.

## **9.2. Prestaciones accesorias y trabajos por administración**

El Adjudicatario está obligado a realizar, según lo establecido en el pliego, trabajos de pequeña importancia con el fin de cumplir con las especificaciones contratadas, y prestaciones complementarias en régimen de Administración.

Los trabajos realizados en régimen de Administración serán remunerados como un porcentaje superior al 100% (acordado por la Propiedad y el Adjudicatario) de los importes totales de mano de obra (número de horas trabajadas por el personal obrero directamente empleado en estas tareas por la tarifa media horaria correspondiente al trabajo realizado, según un baremo acordado) y los importes de los materiales y suministros empleados, incluyendo el transporte hasta el almacén de obra.

Se remunerarán también el empleo de equipo auxiliar, que incluye la mano de obra y combustible o energía correspondiente al uso del equipamiento auxiliar del Adjudicatario.

Además, se abonará al Adjudicatario, según una tarifa establecida, una remuneración en concepto de la utilización de maquinaria de su propiedad o subcontratada, incluyendo los gastos de conservación, reparaciones o recambios.

Se emplearán una o varias tarifas según el tipo de maquinaria y expresados en un tanto por mil del valor de la maquinaria por hora o día de utilización.

Cuando la Propiedad y el Adjudicatario decidan traer a la obra nueva maquinaria, especialmente en el caso de que los trabajos sean por Administración, se remunerará al Adjudicatario según lo expuesto en el apartado anterior, pero se añadirá un pago en concepto de inmovilización, expresada igualmente en tanto por mil del valor de la maquinaria por día de inmovilización. Además, en este caso, se abonará al Adjudicatario el transporte de la maquinaria a la obra y la retirada de la misma, y los gastos de montaje y desmontaje si fuesen significativos.

Cuando una máquina sea utilizada fuera del plazo en el que se realicen los trabajos para los cuales está designada, se retribuirá al Adjudicatario en concepto de inmovilización según lo señalado en el párrafo anterior.

### **9.3. Trabajos no previstos**

Cuando se juzgue necesario ejecutar trabajos no previstos, se acordarán los precios correspondientes, teniendo en cuenta los establecidos en el contrato para operaciones similares, o los de obras semejantes que se tomen como referencia. Los nuevos precios deberán estar basados en las mismas condiciones económicas que los establecidos en el contrato de forma original.

Si existiese desacuerdo entre el Adjudicatario y la Propiedad por los precios para el abono de los trabajos no previstos, el Adjudicatario quedará relegado al desarrollo de los trabajos originalmente contratados, sin derecho a ningún tipo de indemnización, y la Propiedad podrá decidir si realizar una nueva contrata para los trabajos no previstos, o abonarlos de forma excepcional en régimen de Administración.

Si el Adjudicatario procediese a la realización de los trabajos o acopio de materiales para los mismos, sin previa aprobación de la Propiedad, se entenderá que el Adjudicatario aceptará los precios fijados unilateralmente por la Propiedad.

#### 9.4. Revisión de precios

En caso de que tengan lugar variaciones de las condiciones económicas durante el desarrollo de las tareas contratadas, los precios establecidos podrán ser revisados mediante la aplicación de un coeficiente corrector al precio original, como se indica en la ecuación 1.

$$P = P_0 * K \quad (1)$$

Dónde P es el precio corregido, P<sub>0</sub> es el precio original, y K es el coeficiente corrector se calculará de forma ponderada según la fluctuación de los precios de mano de obra y los materiales durante el período a revisar, que se expresarán como índices, asimilables a los publicados para los contratos públicos por el Comité Superior de Precios, y según las formula tipo establecidas en RD 1359/2011, de 7 de Octubre, en el que se aprueba la relación de materiales básicos y formulas-tipo generales de revisión de precios de los contratos de obras de las Administraciones Públicas.

Para un contrato, podrán determinarse diferentes valores del coeficiente K, en función del trabajo y los materiales empleados para el mismo.

La revisión de precios se producirá únicamente en el caso de producirse variaciones de los índices previstos para la obra. La Propiedad establecerá en cada caso la fórmula o fórmulas de revisión a emplear, y otras normas complementarias de aplicación.

Si los trabajos no han sido finalizados dentro del plazo total de ejecución previsto en el contrato, este podrá ser aumentado en un tiempo igual al de los retrasos reconocidos por la Propiedad como producidos por circunstancias ajenas al Adjudicatario. Durante este período de ampliación, no podrán corregirse los precios al alza, aplicándose los coeficientes K obtenidos en el momento de la comprobación de precios previa a la finalización del período de obra.

Cuando los precios incorporen elementos que dependan de un sistema económico extranjero, su revisión se limitará únicamente a la fracción de cada uno de ellos cuyas variaciones dependa de las condiciones en España. Si el contrato prevé, de forma excepcional, la revisión de precios que dependan parcial o totalmente de un sistema económico extranjero, el importe revisado por las formulas establecidas, estará limitado al valor obtenido:

- Al convertir el precio inicial de la divisa extranjera en la que se encuentre, a euros, al cambio en la fecha de referencia.

- Aplicando el precio inicial, si estuviese expresado en euros, la fórmula de revisión establecida con una asimilación de los índices de precio en el país extranjero a los índices españoles
- Convirtiendo el importe obtenido en la divisa del país de origen con el cambio aplicable en la fecha de revisión de precios.

### **9.5. Condiciones de pago**

Para el pago de los diferentes equipos y servicios presentados en el contrato, se considerarán dos partidas diferenciadas:

- Equipos y materiales entregados en el lugar de montaje.
- Montaje e instrucción del personal de explotación de la Propiedad.

En el contrato se incluirá una cláusula en la que se indique de forma clara el procedimiento mediante el cual la Propiedad realizará el pago al Adjudicatario.

El coste del montaje será abonado de forma completa en la fecha de recepción definitiva de las instalaciones, salvo que se indique de otra forma en el contrato. En él se indicará el porcentaje sobre el coste total de los suministros y servicios prestados por el Adjudicatario, que no se abonarán hasta la terminación del plazo de garantía.

### **9.6. Penalizaciones**

Se le podrán aplicar penalizaciones al Adjudicatario, e incluso podrá ordenarse la rescisión del contrato en los siguientes casos:

- Si no se respetan los plazos totales o parciales de realización de las obras, establecidos por el programa de obra.
- Si se retrasa la entrega de la documentación técnica.
- Si el equipo, o parte de él, no fuese adecuado para el servicio industrial para el que fue especificado.
- Si los resultados de las medidas o ensayos no se corresponden con los valores garantizados.

Aparte de las penalizaciones especificadas, el Adjudicatario asumirá los gastos originados por los retrasos que le sean imputables.

Las penalizaciones o rescisión del contrato que se menciona serán aplicadas una vez que la Propiedad compruebe la imposibilidad de que el Adjudicatario pueda corregir los defectos, faltas o desvíos de las especificaciones, y después de que se hayan introducido las modificaciones del equipo establecidas por la Propiedad. La cuantía de la penalización será determinada en cada caso particular en función del perjuicio causado a la Propiedad.

La Propiedad notificará al Adjudicatario la aplicación de penalizaciones por escrito, en concreto mediante carta con acuse de recibo.

### **9.7. Indemnizaciones a favor del Adjudicatario**

El Adjudicatario tendrá derecho a indemnización por las pérdidas, acerías y daños imputables a la Propiedad que hayan sido debidamente comprobadas, y eventualmente las imputables a causas de fuerza mayor.

Será responsabilidad del Adjudicatario tomar las disposiciones necesarias para que su material e instalaciones no puedan sufrir daños como consecuencia de fenómenos naturales previsibles o agentes humanos.

En el caso de que el Adjudicatario estime que han existido causas de fuerza mayor sobre el daño a su equipamiento y material, lo deberá señalar a la propiedad por escrito dentro de un plazo acordado previamente.

La Propiedad se reserva el derecho de fijar indemnizaciones a favor del Adjudicatario, y decidir si el motivo por el que reclama la indemnización se adscribe a lo expuesto en este apartado. Pasado el plazo establecido de comunicación, se entenderá que el Adjudicatario rechaza a ninguna indemnización.

### **9.8. Cese o aplazamiento de los trabajos, rescisión del contrato**

En el caso de que la Propiedad ordene el cese absoluto de los trabajos, el contrato se dará por rescindido. Si la Propiedad ordena su aplazamiento por más de un año, antes o después del comienzo de las obras, el Adjudicatario tendrá derecho a la rescisión del contrato, que deberá solicitar por escrito, sin rechazar por ello a las posibles indemnizaciones que le corresponda. La solicitud de rescisión deberá ser planteada dentro de un plazo preestablecido, comenzado tras la emisión de la orden de paralización de los trabajos, tras el cual se entenderá que el Adjudicatario rechaza ese derecho.

Si la Propiedad ordena el aplazamiento de los trabajos por menos de un año, el Adjudicatario no tendrá derecho a la rescisión, pero si a una indemnización correspondiente a los perjuicios demostrables que se le causen.

En el caso de que los trabajos ya hubiesen comenzado, el Adjudicatario puede requerir que se proceda a la recepción provisional de las unidades de obra terminadas, y en estado de ser recibidas, y posteriormente a la recepción definitiva, una vez que finaliza el período de garantía.

En el caso de quiebra o suspensión de pagos de Adjudicatario, el contrato quedará inmediatamente rescindido, bastando para ello que la Propiedad lo notifique en un plazo establecido tras la declaración legal de quiebra o la suspensión de pagos.

En todo momento las medidas de conservación o seguridad urgentes serán tomadas por la Propiedad, con el posterior cargo al Adjudicatario.

Cuando el Adjudicatario no cumpla con las disposiciones y obligaciones del contrato, o las ordenes que le sean dadas por la Propiedad, este será obligado a ajustarse a ellas en un plazo preestablecido a partir de la notificación de la obligación.

Pasado el plazo establecido, si el Adjudicatario no ha cumplido con las obligaciones prescritas, la Propiedad podrá ordenar, de forma provisional, el establecimiento de un régimen de intervención o parcial de las obras, que correrá a cuenta del Adjudicatario. Se procederá, en presencia del Adjudicatario, a la comprobación de los trabajos realizados y los materiales almacenados, realizándose un inventario del mismo. Se devolverá al adjudicatario aquella fracción de los mismos que no vaya a utilizarse para la terminación de la obra.

Tras esta situación, la Propiedad podrá rescindir de forma completa el contrato, suspender la intervención temporal de forma que el Adjudicatario retome el control de los trabajos, o convocar un nuevo concurso para la búsqueda de ofertas, que correrá por cuenta del Adjudicatario.

Durante el período de intervención, el Adjudicatario tendrá derecho a conocer la marcha de los trabajos, pero en ningún caso podrá entorpecer o dificultar el desarrollo de los mismos. El Adjudicatario podrá retomar el control de la obra, con el régimen de intervención suspendido, si acredita su capacidad de hacerse cargo de la misma, asegurando su finalización dentro de los plazos establecidos, y cumpliendo el resto de prescripciones indicadas en el contrato y en el pliego de condiciones. Los gastos resultantes del régimen de intervención, o del nuevo

contrato correrán a cuenta del Adjudicatario, descontándosele de las sumas a pagar por el resto de la obra realizada, que en caso de ser insuficientes no eximirán al mismo del pago de la cantidad restante. Si la intervención o el nuevo contrato suponen una disminución de los gastos, el Adjudicatario no tendrá derecho a ningún tipo de indemnización o beneficio, percibiendo la cantidad acordada, con la diferencia a beneficio de la Propiedad.

En todos los casos de rescisión del contrato se procederá, junto con el Adjudicatario o alguno de sus representantes, a la comprobación de los trabajos realizados, el inventariado del material y la maquinaria, y la revisión de la instalación de obra.

En caso de que la rescisión se produzca por causas distintas a una solicitud expresa por parte de la Propiedad, esta podrá exigir al Adjudicatario que mantenga en la obra la totalidad o parte de sus instalaciones, maquinaria o material, con el objetivo de poder continuar con el desarrollo de los trabajos, bien por cuenta de la Propiedad o de un nuevo Adjudicatario. De este modo, las instalaciones, maquinaria o material mencionado pasarán a disposición de la Propiedad o del nuevo Adjudicatario hasta la fecha establecida de terminación de obra, sin tener derecho el Adjudicatario a ningún tipo de compensación por este uso.

En los casos de rescisión por solicitud expresa de la Propiedad, se decidirá de mutuo acuerdo entre esta y el Adjudicatario el material que debe permanecer en la obra y la indemnización que percibirá el Adjudicatario como compensación.

En ningún caso el Adjudicatario tendrá derecho a retirar de la obra instalaciones, materiales o maquinaria sin autorización por escrito de la propiedad. Será obligación de la Propiedad notificar, en un plazo acordado desde la fecha de rescisión, aquellos materiales, instalaciones o maquinaria que deben permanecer en la obra, y el plazo en que el Adjudicatario deberá retirar el material restante, que la Propiedad no vaya a emplear para la terminación de las obras.

Planta de Producción de Butan-2-ona

## **DOCUMENTO V**

### **Presupuesto**

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

*Universidade de Santiago de Compostela*

*Escola Técnica Superior de Enxeñaría*

Septiembre 2017

Pablo Otero Jorge

## Índice

1.	Introducción .....	3
2.	Método factorial .....	6
3.	Costes directos .....	7
3.1.	Calculo de costes de los equipos.....	7
3.2.	Costes de los equipos .....	14
3.3.	Instalación de equipos.....	14
3.4.	Tuberías .....	14
3.5.	Instrumentación y control.....	15
3.6.	Instalación eléctrica.....	15
3.7.	Utilidades.....	15
3.8.	<i>Off-Site</i> .....	16
3.9.	Edificios .....	16
3.10.	Preparación del terreno .....	16
3.11.	Costes directos totales .....	17
4.	Costes indirectos .....	17
4.1.	Costes de diseño, ingeniería y supervisión .....	17
4.2.	Contingencias .....	17
4.3.	Costes indirectos totales .....	18
5.	Costes fijos totales .....	18

## 1. Introducción

El presupuesto tiene como objetivo obtener una estimación del coste total de la planta de producción de butan-2-ona que es objeto del presente proyecto.

Se debe tener en cuenta que se trata de una estimación preliminar del coste, limitada por el grado de desarrollo alcanzado en el trabajo de fin de grado, que se ha centrado en el diseño riguroso de la columna de destilación; y que por tanto proporciona información aproximada del resto de los equipos.

Los costes totales requeridos para poner en marcha la instalación pueden dividirse en 2 grandes bloques, que a su vez se subdividen en un total de 5 categorías: [1]

El primer bloque lo constituyen los costes fijos de la instalación, que representan el gasto inicial necesario para la construcción de la planta:

- **Costes en batería de proceso:** El término batería de proceso hace referencia a la zona del proceso en la que tiene lugar la transformación de las materias primas a los productos, incluyendo el equipamiento de proceso y aquellos edificios en los que puedan estar albergados; mientras que excluye el equipamiento para la generación de utilidades, zonas de almacenamiento y otras infraestructuras auxiliares al proceso.

Los costes de batería de proceso están formados por:

- Coste de los equipos (entregados).
  - Costes de instalación de los equipos.
  - Coste de tuberías (instaladas).
  - Costes de instrumentación y control (instalado).
  - Costes de instalación eléctrica.
  - Costes de contingencias.
- **Costes de utilidades:** Incluye los costes de la generación de utilidades, y su distribución hasta el límite de batería del proceso. Los principales son la generación y distribución de vapor, agua de refrigeración, aire comprimido, la distribución de electricidad y los gases inertes para el almacenamiento.
  - **Costes *off-site*:** Incluye los costes de todas las instalaciones de la planta que no se incluyan dentro de la batería del proceso o la generación y distribución de utilidades. Son significativos los costes de los edificios auxiliares (oficinas, sala de control, laboratorio), y de preparación del terreno, que incluye la construcción de los viales internos de la planta.

- **Costes de ingeniería:** Son los costes asociados al diseño de la instalación, así como la supervisión de la construcción de la planta y la adquisición e instalación de los equipos.

El segundo bloque está constituido por el capital circulante:

- **Capital circulante:** Define la inversión necesaria que se debe realizar en la instalación para completar su puesta en funcionamiento, incluyendo la compra y transporte de las materias primas, los costes del catalizador y otro material que se consuma en el proceso, los salarios del personal y el crédito extendido a los clientes o el recibido de los proveedores.

Todas estas partidas pueden ser estimadas mediante diversos métodos a partir del coste total de los equipos principales del proceso. Concretamente, se va a utilizar un método factorial que se detalla en el siguiente apartado.

El coste de los equipos se puede calcular de forma aproximada según la ecuación 1: [1]

$$C_E = C_B * \left(\frac{Q}{Q_B}\right)^M \quad (1)$$

Dónde:

- $C_E$  es el coste del equipo con capacidad  $Q$ .
- $C_B$  es el coste de referencia para un equipo con capacidad  $Q_B$ .
- $M$  es un factor exponencial dependiente del tipo de equipo.

Los datos de referencia para aplicar la ecuación 1 se van a tomar de la fuente [1], que concretamente se corresponde a costes para enero del año 2000. Por tanto va a ser necesario actualizar el valor del coste. Para ello se utiliza los índices de coste, que se aplican según la ecuación 2:

$$C_2 = C_1 * \frac{Indice_1}{Indice_2} \quad (2)$$

Dónde:

- $C_1$  es el coste del equipo en el año de referencia, con el índice<sub>1</sub>.
- $C_2$  es el coste del equipo en el año actual, con el índice<sub>2</sub>.

Los datos de la fuente tienen un índice de equipo (*Chemical Engineering Index of Equipment* o *CE Index of Equipment*) con un valor de 435,8; que se va a corregir con un valor del índice en marzo de 2016, de 556,8; disponible en la fuente [2]. Los precios se cambian a euros con un factor de 0,90 €/\$.

Adicionalmente, puede ser necesario corregir el precio del equipo si el material utilizado es distinto al del equipo que proporciona el coste de referencia, o si varían significativamente las condiciones de presión y temperatura. Para ello, se utiliza la ecuación 3:

$$C_E = C_B * \left(\frac{Q}{Q_B}\right)^M * f_M * f_P * f_T \quad (3)$$

Dónde los términos son análogos a la ecuación 2, excepto:

- $f_M$  es el factor de corrección por material.
- $f_P$  es el factor de corrección por presión.
- $f_T$  es el factor de corrección por temperatura.

Los factores de corrección están disponibles en la fuente [1], y se presentan en las tablas 1-4:

**Tabla 1 - Factor de corrección por material en columnas de destilación y recipientes a presión [1]**

<b>Material</b>	<b><math>f_M</math></b>
Acero al carbono	1
Acero inoxidable (grado bajo)	2,1
Acero inoxidable (grado alto)	3,2
Titanio	7,7

**Tabla 2 - Factor de corrección de material en intercambiadores de carcasa y tubos [1]**

<b>Material</b>	<b><math>f_M</math></b>
Acero al carbono	1
Acero al carbono (carcasa) / Aluminio (tubos)	1,3
Acero al carbono (carcasa) / Inox grado bajo (tubos)	2,4
Acero inoxidable grado bajo	2,9

**Tabla 3 - Factor de corrección de presión [1]**

<b>Presión absoluta (bar)</b>	<b><math>f_P</math></b>
0,01	2
0,1	1,3
0,5-7	1
50	1,5
100	1,9

Tabla 4 - Factor de corrección de temperatura [1]

Temperatura (°C)	$f_T$
0-100	1
300	1,6
500	2,1

Una vez realizadas todas las correcciones se tendría el valor del coste aproximado del equipo, que una vez determinado para el conjunto de los equipos de la planta, permite aplicar el método factorial para la estimación del resto de partidas.

## 2. Método factorial

El un método de estimación que permite determinar el coste del resto de partidas significativas para el cálculo de los costes totales de la instalación, tanto los fijos como el capital circulante, a partir del coste total de los equipos entregados.

El coste de cada una de las partidas se calcula según la ecuación 4:

$$C_{partida} = f_i * \sum_i C_{E,i} \quad (4)$$

Dónde:

- $C_{partida}$  es el coste de la partida a determinar.
- $f_i$  es el factor que se aplica a la partida a determinar.
- $C_{E,i}$  es el coste entregado para cada equipo.

En la tabla 5 se detallan las partidas a estudiar y los factores que aplican a cada una de ellas, y en la ecuación 5 se presenta el cálculo de los costes totales de forma resumida:

$$C_F = \sum_i [(f_M * f_P * f_T * (1 + f_{PIP})) * C_{E,i} + (f_{ER} + f_{INST} + f_{ELEC} + f_{UTIL} + f_{OS} + f_{BUILD} + f_{SP} + f_{DEC} + f_{CONT} + f_{WS}) * \sum_i C_{E,i} \quad (5)$$

Dónde los términos o bien son análogos a los de la ecuación 4, o bien se describen en la tabla 5. Cabe destacar que adicionalmente de la corrección por material, temperatura y presión de los equipos, se deben también realizar para las tuberías, por lo que el factor de tuberías  $f_{PIP}$  aparece dentro del término de sumatorio de los equipos.

Tabla 5 - Partidas y factores de aplicación [1]

Partida	Factor
<i>Costes directos</i>	
Equipos entregados	1
Instalación de los equipos, $f_{ER}$	0,4
Tuberías (instaladas), $f_{PIP}$	0,7
Instrumentación y control (instalado) , $f_{INST}$	0,2
Costes eléctricos (instalados) , $f_{ELEC}$	0,1
Utilidades, $f_{UTIL}$	0,5
Costes <i>Off-site</i> , $f_{OS}$	0,2
Edificaciones, $f_{BUILD}$	0,2
Preparación del terreno, $f_{SP}$	0,1
<b>TOTAL Costes Directos</b>	<b>3,4</b>
<i>Costes indirectos</i>	
Diseño, ingeniería y construcción, $f_{DEC}$	1
Contingencias, $f_{CONT}$	0,4
<b>TOTAL Costes Fijos</b>	<b>4,8</b>
<i>Capital Circulante</i>	
Capital circulante, $f_{WC}$	0,7
<b>TOTAL Coste</b>	<b>5,8</b>

### 3. Costes directos

#### 3.1. Calculo de costes de los equipos

En este apartado se procede a la determinación del coste de los equipos, comenzando por la columna de destilación T-102, de la cual se ha realizado el diseño riguroso, por lo que se puede realizar una buena aproximación del coste real.

##### 3.1.1. Columna de destilación T-102

En el método que se está siguiendo, proporcionado por la fuente [1], el coste de la columna de destilación se calcula como la suma del coste de la carcasa y de los platos. Los datos de referencia para el cálculo del coste de la columna de destilación se presentan en la tabla 6.

Tabla 6 - Datos de referencia para el coste de la carcasa de la columna de destilación [1]

Equipo	Material	Medida de referencia	Tamaño base $Q_B$	Coste Base $C_B$ (\$)	Rango tamaño	Exponente $M$
Torre de destilación (carcasa)	Acero al carbono	Masa (t)	8	$6,56 \times 10^4$	8-300	0,89

Dado que la medida de referencia para la columna de destilación indicada por la fuente es la masa de la columna de destilación, será necesario determinar el volumen de la carcasa de la columna T-102, para conocida la densidad del acero al carbono, poder determinar la masa de la torre.

La columna T-102 está dividida en 4 secciones de espesor variable, por lo que se va a realizar el cálculo de volumen para cada una de ellas de forma independiente. El volumen se calcula según la ecuación 6:

$$V = \pi * L * \left[ \left( \frac{D_c}{2} + t \right)^2 - \frac{D_c^2}{4} \right] \quad (6)$$

Dónde:

- V es el volumen de la sección, m<sup>3</sup>.
- L es la longitud de la sección, m.
- D<sub>c</sub> es el diámetro de la columna, m.
- t es el espesor de la sección, m.

Los datos utilizados por la ecuación 6 se recogen en la tabla 7, junto con los volúmenes de cada sección y el total para toda la columna, que tiene un diámetro de 1,43 m.

**Tabla 7 - Dimensiones de la columna T-102**

Sección	Longitud (m)	Espesor (mm)	Volumen (m <sup>3</sup> )
1	8	7	0,25
2	8	9	0,32
3	8	11	0,39
4	7,5	13	0,43
<b>TOTAL</b>	<b>31,5</b>	-	<b>1,42</b>

Conocido el volumen, considerando una densidad del acero al carbono de 8000 kg/m<sup>3</sup> [3] se puede calcular el peso total de la columna de destilación, indicado en la tabla 8.

**Tabla 8 - Peso de la carcasa de la columna T-102**

<b>Peso (kg)</b>	<b>11.360</b>
------------------	---------------

Conocidos los datos de referencia (tabla 6) y el peso del equipo, se puede aplicar la ecuación 1 para calcular el coste no actualizado, que posteriormente se corrige con la ecuación 2 y los índices de precios indicados en el apartado 1.

No se aplican factores de corrección por material, presión o temperatura; ya que la columna opera dentro de los rangos de presión y temperatura con factor 1, y está fabricada en acero al carbono. Los resultados se indican en la tabla 9.

Tabla 9 - Costes de la carcasa de la columna T-102

<b>C<sub>E</sub> no actualizado (€)</b>	80.664,60
<b>C<sub>E</sub> actualizado (€)</b>	103.061,15

Adicionalmente, es necesario determinar los costes de los platos de la columna de destilación, de tipo perforado. Los datos de referencia se suministran para 10 platos, y aparecen indicados en la tabla 10.

Tabla 10 - Datos de referencia para platos perforados [1]

<b>Equipo</b>	<b>Material</b>	<b>Medida de referencia</b>	<b>Tamaño base Q<sub>B</sub></b>	<b>Coste Base C<sub>B</sub> (\$)</b>	<b>Rango tamaño</b>	<b>Exponente M</b>
Plato perforado (10 uds.)	Acero al carbono	Diámetro (m)	0,5	6,56 x10 <sup>3</sup>	0,5-4	0,91

Se corrige el coste para 10 platos en el diámetro de la columna T-102 mediante la ecuación 1, y posteriormente se corrige con el índice de precios actual con la ecuación 2. De nuevo, al igual que en la carcasa, no es necesario corregir por material, presión o temperatura. Por último se multiplica el coste de 10 platos por 4,2 (42 platos), para obtener el coste total de los platos. Los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 - Costes de los platos de la columna T-102

<b>C<sub>E</sub> no actualizado (€) (10 platos)</b>	15.361,71
<b>C<sub>E</sub> actualizado (€) (10 platos)</b>	19.626,89
<b>C<sub>E</sub> actualizado (€) (42 platos)</b>	82.432,93

Se puede determinar finalmente el coste total de la columna, como la suma del coste de la carcasa y de los platos, cuyo valor se indica en la tabla 12.

Tabla 12 - Coste total de la columna T-102

<b>C<sub>E</sub> T-102 (€)</b>	185.494,08
--------------------------------	------------

### 3.1.2. Reactor R-101

Dado que no se ha realizado el diseño del reactor R-101, se va a realizar una estimación del volumen de catalizador mediante un valor de  $W/F$  que relaciona la masa de catalizador requerida por flujo molar de butan-2-ol, proporcionada por la fuente [4], con un valor de 260 kg de catalizador s/mol.

Al reactor se alimentan 40,04 kmol/h de butan-2-ol, o 11,12 mol/s, que multiplicados por la relación  $W/F$ , proporciona un requerimiento de masa de catalizador de 2891,77 kg. Suponiendo un valor del catalizador industrial de aproximadamente 2 €/kg, se obtiene un coste de 5783,54 €.

La densidad típica de un catalizador particulado, teniendo en cuenta el volumen hueco, se encuentra en el rango de 0,5-1,5 kg/L [5]. Tomando el valor intermedio del rango, de 1kg/L, se obtiene un volumen de catalizador de prácticamente 3 m<sup>3</sup>, a partir del cual se puede estimar el volumen del reactor, sobredimensionando al doble de volumen al tratarse de un reactor de lecho fijo tubular. Los datos de referencia para el cálculo del coste de reactor se incluyen en la tabla 13, aunque al tratarse de datos para un reactor de tanque agitado, más sencillo que uno de lecho fijo tubular, se va a sobredimensionar el valor final en un 25%.

Tabla 13 - Datos de referencia para el cálculo de coste del reactor [1]

Equipo	Material	Medida de referencia	Tamaño base $Q_B$	Coste Base $C_B$ (\$)	Rango tamaño	Exponente $M$
Reactor	Acero al carbono	Volumen (m <sup>3</sup> )	1	1,15 x10 <sup>4</sup>	1-50	0,45

Aplicando la ecuación 1, y corrigiendo con la ecuación 2, se obtiene el coste actualizado del reactor, previo a la corrección por factores de diseño. En este caso se corrige por temperatura, ya que el reactor opera a 260 °C, con un factor  $f_T$  de 1,6 (según la tabla 4), y un factor de corrección por material  $f_M$  de 2,1, ya que el reactor se construiría en acero inoxidable al trabajar en unas condiciones más agresivas. Los resultados de los cálculos del coste se muestran en la tabla 14.

Tabla 14 - Costes del reactor R-101

<b><math>C_E</math> no actualizado (€)</b>	23.179,73
<b><math>C_E</math> actualizado (€)</b>	29.615,59
<b><math>C_E</math> corregido (€)</b>	99.508,39
<b><math>C_E</math> sobredimensionado (€)</b>	149.262,58
<b><math>C_E</math> corregido + catalizador (€)</b>	155.046,12

### 3.1.3. Torre de absorción T-101

Dado que no se ha realizado el diseño de la torre de absorción, se va a realizar la estimación del coste a partir del coste conocido para la columna de destilación T-102. En concreto, se va a estimar el coste como un 75% del total de la columna de destilación T-101, ya que el precio del relleno es inferior al de los platos, y las dimensiones deberían ser inferiores.

El coste estimado se indica en la tabla 15.

Tabla 15 - Coste de la columna T-101

<b>C<sub>E</sub> T-101 (€)</b>	139.120,56
--------------------------------	------------

### 3.1.4. Separador líquido-vapor V-101

Para estimar las dimensiones del separador de fases, se va a estimar la velocidad de sedimentación de las gotas de líquido, según la ecuación 7: [3]

$$u_t = 0,15 * 0,07 * [(\rho_L - \rho_V)/\rho_V]^{1/2} \quad (7)$$

Dónde:

- $u_t$  es la velocidad de sedimentación de una gota, m/s.
- $\rho_L$  es la densidad del líquido, kg/m<sup>3</sup>.
- $\rho_V$  es la densidad del vapor, kg/m<sup>3</sup>.

Con la velocidad de sedimentación se puede estimar el diámetro requerido para el recipiente, según la ecuación 8: [3]

$$D_V = \sqrt{\left(\frac{4 * V_v}{\pi * u_t}\right)} \quad (8)$$

Dónde

- $D_V$  es el diámetro del recipiente, m.
- $V_v$  es el caudal volumétrico del vapor, m<sup>3</sup>/s.

Los datos y resultados de los cálculos realizados en el separador V-101 se detallan en la tabla 16:

Tabla 16 - Diámetro del separado V-101

$u_t$ (m/s)	0,47
$V_v$ (m <sup>3</sup> /s)	0,276
$D_v$ (m)	0,75

La longitud del recipiente se estima según la figura 1, donde el nivel de líquido se calcula de forma que haya un tiempo de retención de 10 minutos.

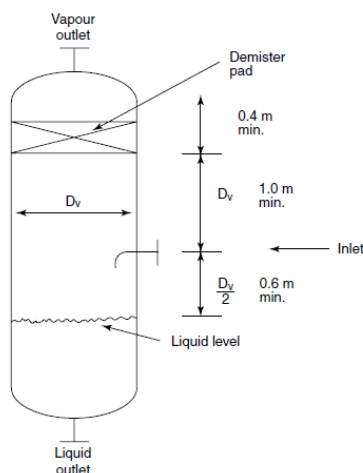


Figura 1 - Dimensiones estándar de un separador de fases [3]

Para un caudal volumétrico de líquido de 9,74 m<sup>3</sup>/s, el volumen requerido para asegurar un tiempo de retención de 10 minutos es de 0,584 m<sup>3</sup>, que para el recipiente de 0,75 m de diámetro, supone una longitud adicional de 1,3 m, con lo que la longitud total del recipiente será de 3,3 metros.

Para estas dimensiones, con un espesor de 7 mm en la carcasa (5 mm de espesor mínimo + 2 mm por corrosión), el volumen de material en la carcasa es de 6 x10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>, calculado según la ecuación 6, con lo que con la densidad considerada para el acero al carbono, la masa total es de 479 kg. El coste se estima según los valores de referencia indicados en la tabla 17.

Tabla 17 - Datos base para el cálculo del coste de un recipiente [1]

Equipo	Material	Medida de referencia	Tamaño base Q <sub>B</sub>	Coste Base C <sub>B</sub> (\$)	Rango tamaño	Exponente M
Recipiente	Acero al carbono	Masa (t)	6	9,84 x10 <sup>4</sup>	6-100	0.82

Obteniéndose un valor de 11.143,68 € sin actualizar, y un valor final de 14.237,73 €.

### 3.1.5. Intercambiadores de calor

Para el cálculo del coste de los intercambiadores de calor se realiza una estimación preliminar del área del área, que es la medida de referencia para la estimación del coste. El área se va a estimar según la ecuación 9:

$$Q = U * A * \Delta T_{m,log} \quad (9)$$

Dónde:

- U es el coeficiente de intercambio de calor, W/m<sup>2</sup> °C.
- A es el área de intercambio, m<sup>2</sup>.
- $\Delta T_{m,log}$  es la media logarítmica de las temperaturas, °C.

Los valores de U se pueden estimar según los datos proporcionados por la fuente [3], y los valores de la media logarítmica se determinan de forma aproximada, suponiendo un incremento de 20 °C en el agua de refrigeración, y con temperatura constante para el vapor de baja y alta presión. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 18.

Tabla 18 - Estimación áreas intercambiadores

Intercambiador	Fluidos	Q (kJ/h)	U (W/m <sup>2</sup> °C)	$\Delta T_{m,log}$ (°C)	A (m <sup>2</sup> )
E-101	org./org.	5,16E+05	100	160	9,0
E-102	org./lps	2,52E+06	900	62	12,5
E-103	vap. org./hps	9,52E+05	50	57	92,8
E-104	org./ agua. enf.	3,31E+06	250	65	56,6
E-105	org./lps	3,99E+06	900	61	20,2
E-106	vap. org./cw	3,91E+06	700	40	38,8

Con las cuales se puede estimar el coste de los mismos. Los valores sin actualizar, actualizados, y corregidos se muestran en la tabla 19.

Tabla 19 - Costes de los intercambiadores

Intercambiador	C <sub>E</sub> no act. (€)	C <sub>E</sub> act (€)	C <sub>E</sub> corregido (€)
E-101	6660,85	8510,24	32679,31
E-102	8374,73	10699,97	41087,89
E-103	32651,87	41717,67	160195,87
E-104	23325,57	29801,92	114439,36
E-105	11568,04	14779,91	56754,84
E-106	18038,11	23046,40	88498,18
<b>TOTAL</b>	<b>100619,17</b>	<b>128556,11</b>	<b>493655,45</b>

### 3.2. Costes de los equipos

Teniendo en cuenta las estimaciones anteriores, se calcula el montante total de los equipos, que se indica en la tabla 20.

Tabla 20 - Coste del equipamiento

Equipamiento	Importe (€)
Coste total	987.553,93

### 3.3. Instalación de equipos

El coste de instalación de los equipos incluye los costes de mano de obra, cimentaciones, construcción de estructuras, y otros factores relacionados. Para el cálculo del importe se aplica un factor de 0,4 al coste de los equipos, según lo indicado en la fuente [1]. El valor de la partida se indica en la tabla 21

Tabla 21 - Costes de instalación

Instalación	Importe (€)
Incluye:	
-Instalación	
-Estructuras auxiliares	395.021,57
-Aislamiento y recubrimientos	

### 3.4. Tuberías

El coste de las tuberías incluye el coste del material, instalación y construcción de estructuras auxiliares, así como los recubrimientos (aislantes, pinturas), así como los costes de las válvulas y otros accesorios. Se calcula con un factor de 0,7 sobre el coste de los equipos [1]. El valor se recoge en la tabla 22.

Tabla 22 - Coste de las tuberías

Tuberías	Importe (€)
Incluye:	
-Instalación	
-Estructuras auxiliares	691.287,75
-Válvulas y accesorios	
-Aislamiento	

### 3.5. Instrumentación y control

Incluye el coste del equipamiento de control, la instalación, equipamiento auxiliar (cableado, líneas de aire comprimido, etc). Se calcula el coste con un factor de 0,2 sobre el coste de los equipos [1]. Se detalla en la tabla 23.

Tabla 23 - Coste de la instrumentación y el control

Instrumentación y control	Importe (€)
Incluye:	
-Compra	197.510,79
-Instalación	
-Equipo auxiliar	

### 3.6. Instalación eléctrica

Incluye el coste de los equipos de transformación, cableado, iluminación, así como su instalación y puesta en servicio. Se estima el coste mediante un factor de 0.1 sobre el coste los equipos [1]. Mostrado en la tabla 24.

Tabla 24 - Coste de la instalación eléctrica

Instalación eléctrica	Importe (€)
Incluye:	
-Compra equipamiento	98.755,39
-Instalación	
-Puesta en servicio	

### 3.7. Utilidades

Incluye el coste de generación de las utilidades (vapor, agua de refrigeración etc), y su transporte hasta la batería del proceso, así como el tratamiento de efluentes, los gases inertes y las instalaciones antiincendios. Se calculan con un factor de 0,5 sobre el coste de los equipos [1]. El valor final se muestra en la tabla 25.

Tabla 25 - Coste de las utilidades

Utilidades	Importe (€)
Incluye:	
-Generación de utilidades	493.776,97
-Transporte	
-Efluentes y gas inerte	

### 3.8. Off-Site

Incluye los costes de todas las instalaciones auxiliares a la planta, como los viales internos en la parcela, instalaciones de tratamiento de residuos, sistemas de comunicación y otros. Se calculan con un factor de 0,2 sobre el coste de los equipos [1]. El resultado se indica en la tabla 26.

Tabla 26 - Costes off-site

Off-Site	Importe (€)
Incluye:	
-Viales internos	197.510,79
-Instalaciones de tratamiento de residuos	
-Sistemas de comunicación	

### 3.9. Edificios

Incluyen los costes de mano de obra, materiales y otros servicios requeridos para la construcción de los mismos. Se estima con un factor de 0,2 sobre el coste de los equipos [1]. El valor final de la partida se muestra en la tabla 27.

Tabla 27 - Costes de las edificaciones

Edificaciones	Importe (€)
Incluye:	
-Mano de obra	197.510,79
-Materiales	
-Servicios de los edificios	

### 3.10. Preparación del terreno

Incluye los costes de alquiler de maquinaria, mano de obra y otros servicios necesarios para todas las operaciones de preparación del terreno (excavaciones, aplanado etc). Se calcula como un factor de 0,1 sobre el coste total de los equipos. Detallado en la tabla 28.

Tabla 28 - Costes de la preparación del terreno

Preparación del terreno	Importe (€)
Incluye:	
-Maquinaria	98.755,39
-Mano de obra	
-Materiales	

### 3.11. Costes directos totales

La suma de todas las partidas anteriores representa el total de los costes directos, que supone un factor de 3,4 sobre el coste de los equipos. A la suma de las partidas anteriores se suma el importe de compra del terreno, de 17.400 m<sup>2</sup> con un precio de 123 €/m<sup>2</sup> [6], que resulta en un valor de 2.140.200 €. El valor total de los costes directos se indica en la tabla 29.

Tabla 29 - Costes directos totales

Costes directos	Importe (€)
Costes directos totales	4.510.329,443

## 4. Costes indirectos

### 4.1. Costes de diseño, ingeniería y supervisión

Responden a los costes de diseño de equipamiento, supervisión de las adquisiciones, instalación y obras. Se incluye los salarios del personal técnico, así como los recursos que necesitan para desempeñar dichas tareas. Se asigna un factor 1 sobre el coste total de los equipos [1]. El resultado del cálculo se muestra en la tabla 30.

Tabla 30 - Costes de diseño, ingeniería y supervisión

Ingeniería y supervisión	Importe (€)
Incluye:	
-Salarios	987.553,93
-Material y recursos	

### 4.2. Contingencias

Responden a la planificación de una partida para hacer frente a posibles gastos inesperados que surjan durante el desarrollo del proyecto, como sobrecostes en los equipos, accidentes, o problemas climatológicos. Se calculan con un factor de 0,4 sobre el coste de los equipos, y el valor se indica en la tabla 31.

Tabla 31 - Costes de posibles contingencias

Contingencias	Importe (€)
Incluye:	
-Fondos de reserva	395.021,57

### 4.3. Costes indirectos totales

El total de los costes indirectos constituye la suma de los dos factores anteriores, o un factor de 1,4 sobre el coste total de los equipos. El valor total se indica en la tabla 32.

Tabla 32 - Costes indirectos totales

Costes indirectos	Importe (€)
Costes totales	1.382.575,51

### 5. Costes fijos totales

La suma de los costes directos e indirectos supone el total de los costes fijos, la inversión inicial requerida para la construcción de la planta. Se pueden calcular según el método de la fuente [1] con un factor de 4,8 sobre el total del coste de los equipos, al que se le sumaría el coste del terreno. El valor total se detalla en la tabla 33.

Tabla 33 - Costes fijos totales

Costes fijos	Importe (€)
Costes totales	5.892.904,95

### 6. Capital circulante

Representa la cantidad de inversión necesaria para que la planta comience a operar de forma productiva, incluyendo los costes de materias primas, salarios y crédito recibido de los proveedores o extendido a los clientes.

Se puede estimar con un factor de 0,7 sobre el coste total de los equipos. El valor obtenido se muestra en la tabla 34.

Tabla 34 - Capital circulante

Capital circulante	Importe (€)
Coste total	691.287,75

## 7. Presupuesto total

La inversión total requerida corresponde a la suma de los costes fijos (suma de los costes directos e indirectos) y el capital circulante. El total se indica en la tabla 35.

Tabla 35 - Presupuesto total requerido

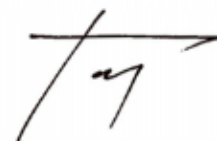
Presupuesto	Importe (€)
Total	6.584.192,71

El presupuesto total de la Planta de Producción de Butan-2-ona por deshidrogenación de Butan-2-ol asciende al total de **SEIS MILLONES QUINIENTOS OCHENTA Y CUATRO MIL CIENTO NOVENTA Y DOS CON SETENTA Y UN EUROS.**

Santiago de Compostela

Julio 2017

El Autor del Proyecto



Pablo Otero Jorge

## Bibliografía

1. **SMITH, Robin.** *Chemical Process Design and Integration*. 1ª Ed. West Sussex : John Wiley & Sons, 2005.
2. **Chemical Engineering.** Current Economic Trends – March 2016. [En línea] Marzo de 2016. [Citado el: 5 de Julio de 2017.] [www.chemengonline.com/current-economic-trends-march-2016/?printmode=1](http://www.chemengonline.com/current-economic-trends-march-2016/?printmode=1).
3. **SINNOTT, R.K.** *Chemical Engineering Design*. 4th ed. Oxford : Elsevier-Butterworth-Heinemann, 2005.
4. *The dehydrogenation of 2-butanol over copper-based catalysts: optimising catalyst composition and determining kinetic parameters.* **KEULER, J.N, LORENZEN, L. y MIACHON, S.** 2001, Applied Catalysis A: General, Vol. 218, págs. 171-180.
5. **CORNILS, Boy y Herrman, WOLFGANG A. Herrman.** Volume 1: A to C. *Catalysis from A to Z: A Concise Encyclopedia*. Weinheim : Wiley-VCH, 2013, Vol. 1.
6. **Instituto Galego de Promoción Económica: IGAPE.** Suelo Industrial: Parque Empresarial de Arteixo (Morás). [En línea] 11 de Marzo de 2016. [Citado el: 23 de Mayo de 2017.] <http://www.igape.es/es/investingalicia-suelo-industrial/ficha/181>.
7. **NEIER, Wilhelm y STREHLKE, Guenter.** 2-Butanone. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 5ª ed. Weinheim : VCH, 1985, Vol. A4, págs. 475-481.