

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Título: Diseño de una unidad de purificación
del proceso SIEMENS

Autor: Daniel VÁZQUEZ LÁINEZ

Fecha: Noviembre 2006





ÍNDICE

1. OBJETIVO.....	1
2. ESTUDIO DE VIABILIDAD.....	2
2.1. INTRODUCCIÓN: ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	2
2.1.1. La situación en el mundo.....	6
2.1.2. Planes europeos relativos a la energía solar fotovoltaica.....	7
2.1.3. La situación en España.....	7
2.1.4 El problema del silicio.....	9
2.2. PRODUCTO Y MATERIAS PRIMAS.....	13
2.3. PROCEDIMIENTO Y CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.....	17
2.4. EMPLAZAMIENTO.....	22
2.4.1. Elección del emplazamiento.....	22
2.4.2. Plano de implantación.....	26
3. MEMORIA TÉCNICA.....	28
3.1. INGENIERÍA DE PROCESOS.....	28
3.1.1. Procedimiento.....	28
3.1.2. Corriente de entrada a la sección de separación.....	32
3.1.2.1. Síntesis.....	33
3.1.2.2. Purificación.....	33
3.1.2.3. Deposición.....	33
3.1.2.4. Recuperación.....	33
3.2. INGENIERÍA DE PROYECTOS.....	36
3.2.1. Cálculo preliminar de las unidades de la sección de separación.....	36
3.2.1.1. Condensador parcial (E-110).....	36
3.2.1.2. Separador gas/líquido (D-210).....	40
3.2.1.3. Columnas de destilación (D-310 y D-320).....	43
3.2.2. Diseño mecánico (D-310).....	53
3.2.2.1. Elección del tipo de columna.....	53

3.2.2.2. Elección del relleno.....	53
3.2.2.3. Altura de relleno.....	54
3.2.2.4. Distribuidor de líquido.....	55
3.2.2.5. Rejilla para soporte y sujeción del relleno.....	56
3.2.2.6. Diseño del recipiente.....	56
3.2.2.7. Resumen de resultados.....	61
4. SERVICIOS GENERALES.....	62
4.1. AGUA DE SERVICIOS.....	62
4.1.1. Agua de defensa contra incendios.....	63
4.1.2. Agua de refrigeración y vapor de calefacción.....	65
4.1.3. Agua potable-sanitaria.....	66
4.1.4. Agua para limpieza.....	67
4.1.5. Necesidades de agua totales para la planta.....	68
4.2. ENERGÍA ELÉCTRICA.....	68
4.2.1. Red de Fuerza circuito de 400/230 V trifásico.....	68
4.2.2. Red de Instrumentación y Control circuito	
4.2.3. de 12/24 V de CC.....	69
4.2.4. Red de Alumbrado: circuito de 400/230 V trifásico.....	69
4.2.5. Red de Seguridad: circuito de 400/230 V trifásico.....	72
4.2.6. Red de Comunicaciones: circuito de 400/230 V trifásico.....	72
4.2.7. Necesidades energéticas totales para la planta.....	72
5. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN.....	74
5.1. CONTROL DEL PROCESO.....	74
5.1.1. Condensador parcial (E-110).....	75
5.1.2. Separador (D-210).....	76
5.1.3. Columnas de destilación (D-310 y D-320).....	76
5.2. INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO.....	77
5.2.1. Instrumentación seleccionada.....	77
5.3. DIAGRAMAS P&Id.....	79

6. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	80
6.1. CAPITAL.....	80
6.1.1. Capital inmovilizado.....	81
6.1.1.1. Estimación de la partida de máquinas y aparatos.....	82
6.1.1.2. Estimación del capital inmovilizado total.....	85
6.1.2. Capital circulante.....	88
6.1.3. Capital previo.....	88
6.1.4. Capital total.....	89
6.2. COSTES.....	89
6.2.1 Costes de fabricación.....	90
6.2.1.1. Materias primas.....	90
6.2.1.2. Mano de obra.....	90
6.2.1.3. Patentes.....	92
6.2.1.4. Servicios generales.....	92
6.2.1.5. Suministro.....	92
6.2.1.6. Conservación y mantenimiento.....	92
6.2.1.7. Laboratorio.....	93
6.2.1.8. Amortización.....	93
6.2.1.9. Alquileres.....	94
6.2.1.10. Impuestos.....	94
6.2.1.11. Seguros.....	94
6.2.1.12. Resumen de los costes de fabricación.....	95
6.1.1. Gastos generales.....	96
6.1.2.1. Gastos comerciales	96
6.1.2.2. Gastos financieros.....	96
6.1.2.3. Servicios técnicos.....	96
6.1.2.4. Gastos de investigación, desarrollo e innovación.....	97
6.1.2.5. Resumen de los costes de fabricación.....	97
6.3. VENTAS.....	97

7. ESTUDIO DE SEGURIDAD.....	100
7.1. INFORMES Y ESTUDIOS DE PREVENCIÓN DE ACCIDENTES REQUERIDOS.....	100
7.1.1. Estudio de seguridad y salud.....	100
7.1.2. Plan de seguridad en obra.....	101
7.1.3. Seguridad durante la producción.....	101
7.1.4. Análisis de Riesgos.....	102
8. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.....	105
8.1 TÉCNICA DE VALORACIÓN DE IMPACTOS.....	106
8.1.1. Sobre la atmósfera.....	106
8.1.2. Sobre el suelo.....	107
8.1.3. Sobre el agua.....	107
8.1.4. Sobre la fauna y la flora.....	108
8.1.5. Sobre el paisaje.....	108
8.1.6. Aspectos culturales.....	108
8.1.7. Aspectos humanos.....	108
8.1.8. Infraestructuras.....	109
8.2 MEDIDAS CORRECTORAS.....	109
8.3 PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL.....	110
9 PLIEGO DE CONDICIONES.....	111
9.1 DISPOSICIONES GENERALES.....	111
9.2 CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA.....	114
9.3 PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA.....	121
9.3.1. Obligaciones y derechos del contratista.....	121
9.3.2. Trabajos. Materiales y Medios Auxiliares.....	122
9.3.3. Recepción y liquidación.....	125
9.3.4. Facultades de la dirección de obra.....	127
9.4 CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA.....	129
9.4.1 Base fundamental.....	129
9.4.2. Garantías de cumplimiento y fianzas.....	129
9.4.3 Precios y revisiones.....	130

9.4.4. Valoración y abono de los trabajos.....	133
9.4.5. Varios.....	135
9.5. CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL.....	137
10 CONCLUSIONES.....	140
11 BIBLIOGRAFÍA.....	141
12 ANEXOS A LA MEMORIA TÉCNICA.....	143
ANEXO 1: Diagramas.....	143
1. Diagrama de bloques general.....	143
2. Diagrama de bloques de la sección objeto de estudio.....	143
3. Diagrama de flujo	144
4. Diagrama de flujo con servicios.....	145
5. P&ID E-110.....	146
6. P&ID D-210.....	147
7. P&ID D-310 y D-320.....	148
ANEXO 2: Ecuación de Antoine extendida y parámetros.....	149
ANEXO 3: Ecuación cúbica de estado de Peng-Robinson.....	150
ANEXO 4: Ecuación para el cálculo de la capacidad calorífica de un gas y parámetros.....	151
ANEXO 5: Correlación de Rowbinson-Bondi para el cálculo de la capacidad calorífica de un líquido.....	152
ANEXO 6: Ecuación para el cálculo del calor latente de vaporización.....	153
ANEXO 7: Cálculo de la viscosidad del líquido.....	154
ANEXO 8: Cálculo de la tensión superficial del líquido.....	155

ANEXO 9: Cálculo de algunos parámetros de equipo.....	156
9.1 Cálculo del área de intercambio del E-110.....	156
9.2 Diámetro y longitud de D-210.....	157
9.3 Diámetro de la columna.....	158
ANEXO 10: Fichas de seguridad.....	163
10.1 Hidrógeno.....	163
10.2 Cloruro de hidrógeno.....	166
10.3 Diclorosilano.....	170
10.4 Triclorosilano.....	173
10.5 Tetraclorosilano.....	176
10.6 Silicio de grado metalúrgico.....	179
ANEXO 11: Análisis Hazop.....	182
11.1 Condensador parcial (E-110).....	182
11.2 Separador (D-210).....	185
11.2 Columnas de destilación (D310 y D-320).....	187
ANEXO 12: Legislación.....	189
13. PLANOS.....	190
13.1. PLANO DE IMPLANTACIÓN	
13.2 DETALLE UNIDAD DE SEPARACIÓN	
13.3. COLUMNA D-310	

1. OBJETIVO

El objetivo del presente proyecto es el estudio y diseño del proceso de obtención de silicio de grado solar a partir de silicio de grado metalúrgico. En la parte correspondiente al diseño de equipos, este proyecto se centra en la unidad concreta de separación y purificación de clorosilanos para obtener una corriente de elevada pureza de triclorosilano, compuesto básico utilizado en la obtención de silicio de grado solar.

El silicio de grado solar se utiliza en la fabricación de las células solares que constituyen los paneles solares fotovoltaicos utilizados para la captación de energía solar, que es una energía alternativa respetuosa con el medio ambiente y que contribuye a un desarrollo sostenible. Actualmente, el silicio utilizado en la fabricación de paneles solares es el silicio de grado semiconductor excedente procedente de la industria microelectrónica. En este proyecto se pretende demostrar la viabilidad de desarrollar un proceso que permita disponer de una fuente independiente de silicio de grado solar.

2. ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL PROYECTO

2.1 INTRODUCCIÓN: ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El ser humano desde sus orígenes viene aprovechando los recursos naturales para transformarlos y así hacer uso de ellos para sus propios intereses. Estos recursos energéticos se han ido ampliando en el tiempo a medida que el ser humano ha ido aumentando sus conocimientos sobre el medio que le rodea y aprovechando mejor dichos recursos.

El uso de los recursos fósiles, que debido a su gran rendimiento energético y a su abaratado coste, ha sido objeto de una sobre-explotación que ha hecho sombra a todas las demás fuentes energéticas del planeta.

Este uso incontrolado de los recursos fósiles ha ocasionado graves daños a nuestro planeta, tales como la desertización o el temible cambio climático que amenaza con destruir a corto y medio plazo gran parte de la diversidad biológica de nuestro planeta, sin olvidar los grandes conflictos y tensiones provocados en nuestra sociedad por controlar dichas fuentes de energía fósiles.

Todo este cúmulo de problemas ha llevado a una concienciación de la población que cada día ve más reticente la dependencia de estos recursos energéticos, y ven la necesidad de nuevas alternativas energéticas más limpias y menos contaminantes. Estas nuevas energías limpias son las conocidas como Energías Renovables que tiene la capacidad de ser inagotables y respetuosas en su gran mayoría con el medio ambiente.

Dentro de estas energías encontramos la Energía solar fotovoltaica, la cual aprovecha las radiaciones solares para convertirla en electricidad. Con la ventaja que esto supone, ya que el sol es una fuente inagotable de energía que además de ser limpia posee la ventaja de que incide en mayor o menor grado en toda la superficie del planeta.

La energía solar fotovoltaica se presenta como una de las alternativas para la obtención de energía más respetuosas con el medio ambiente. El impacto ambiental relativamente bajo de las tecnologías asociadas a la fabricación de paneles solares fotovoltaicos y la capacidad para convertir directamente la luz del sol en electricidad, sin emisiones de CO₂, permiten vislumbrar que su futuro en la generación de energía en todo el mundo es prometedor.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887. La explicación teórica solo fue hecha por Albert Einstein en 1905 quien basó su

formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck. De acuerdo con este fenómeno, ciertos materiales absorben la luz, de modo que la energía de los fotones excita a los electrones del material provocando que, parte de ellos, salgan de sus posiciones para colocarse en posiciones de mayor energía. Este movimiento genera cargas negativas, debidas a los electrones desplazados, y cargas positivas, debidas a los huecos dejados por los electrones.

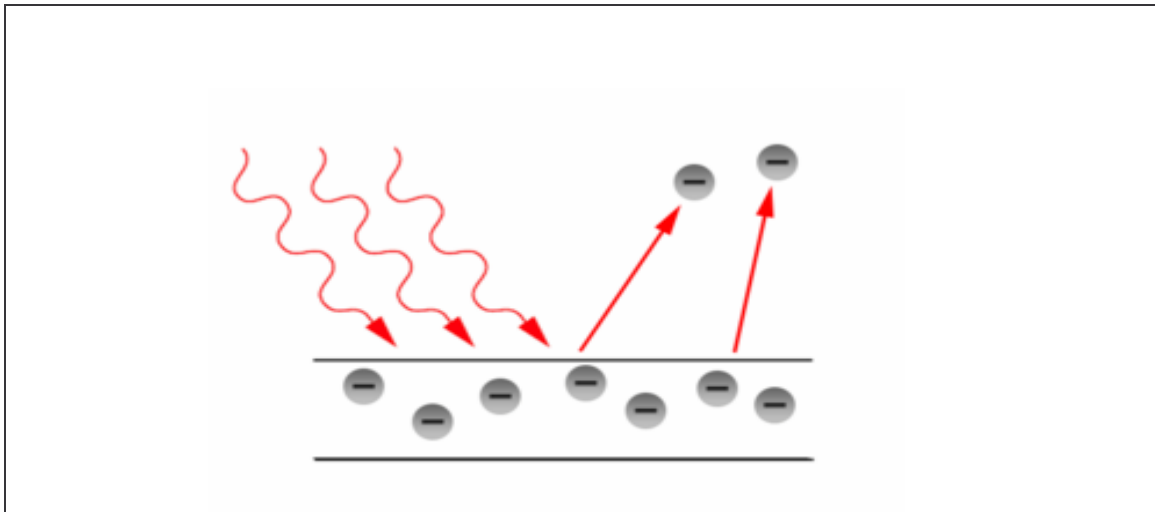


Figura 2.1. Diagrama del efecto fotoeléctrico.

Si los electrones y los huecos generados por la fotoexcitación son separados por un campo eléctrico interno del material, unos y otros se acumulan en los lados opuestos del campo, creándose una diferencia de potencial. Uniendo mediante un circuito los dos lados cargados, se obtiene una corriente eléctrica.

Una célula fotovoltaica es un diodo de gran superficie constituido, habitualmente, por un cristal de silicio con impurezas de boro en una gran parte de su espesor y con impurezas de fósforo sobre su superficie. El efecto del diodo genera un campo eléctrico permanente dentro de la célula, entre la superficie dopada con boro y la superficie dopada con fósforo. Este campo eléctrico provoca la migración de las cargas positivas y negativas hacia un lado u otro, con lo que uno de los lados de la célula se carga positivamente y el otro negativamente. Uniendo estas caras a través de un circuito eléctrico externo se produce una corriente eléctrica. En la industria se ensamblan varias células en serie para formar los denominados módulos que ya poseen un rendimiento energético factible para su uso en diferentes aplicaciones.

Para normalizar la medida de la eficacia de las células y paneles solares fotovoltaicos, se toma como referencia una radiación solar de 1000 W/m^2 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura. La eficacia de una célula es proporcional a esta radiación que la célula

convierte en electricidad, viene dada en porcentaje y suele oscilar, según las características del material, entre el 3 % y 30 %.

La superficie de las células empleadas en la elaboración de un panel solar y la eficacia de las mismas determinarán la potencia de dicho panel. Así, si se habla de un panel solar de 50 W, quiere decir que produce 50 W en una hora bajo una radiación 1000 W/m^2 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Los paneles más frecuentes tienen una potencia comprendida entre 45 W y 85 W.

Este tipo de energía tiene muchas ventajas, entre las que cabe destacar como principales las siguientes:

- La energía que procede del sol es limpia y renovable y, además, no cuesta dinero.
- Los materiales empleados apenas requieren mantenimiento.
- Las instalaciones fotovoltaicas gozan de una larga duración, son silenciosas y se caracterizan por su simplicidad.
- Es una solución inmejorable en zonas aisladas que, de otra forma, no tendrían acceso a la electricidad.
- No requieren grandes inversiones centralizadas.

La energía solar se enfrenta actualmente con diversos retos tecnológicos, pero, sobre todo, con la dificultad de introducir en el mercado una fuente energética con un precio del Kwh alto si se compara con otras tecnologías. Afortunadamente, este alto precio ha ido disminuyendo. Se estima que cada vez que se duplica la producción, el coste de la instalación se reduce un 18 % [1]. En consecuencia, uno de los factores que permitirían la reducción de precios es el salto a una producción a gran escala. Recientemente, la producción de generadores fotovoltaicos de electricidad ha experimentado un crecimiento considerable, acercándose a esa transición hacia la producción en masa.

Debido a este imparable crecimiento ha surgido un inconveniente relacionado con una de las etapas de producción de los paneles solares fotovoltaicos: la escasez de silicio. Los paneles se componen básicamente de silicio de pureza muy elevada ($\geq 99,99 \%$), conocido como silicio de grado solar. Para su obtención se parte del mineral de cuarzo, del cual se extrae el silicio de grado metalúrgico (98,5 %). El proceso hasta el momento más extendido consiste en la purificación hasta silicio de grado semiconductor, con pureza mayor de la requerida para la aplicación que nos ocupa (99,999999 %), seguido de la posterior formación de lingotes de silicio monocristalino o policristalino. El siguiente paso es la obtención de obleas de silicio, resultantes del corte de dichos lingotes. Tras varios tratamientos, con estas obleas se

fabrican las células solares fotovoltaicas, que se agrupan y empaquetan en los paneles solares, que son las unidades comerciales de producción de energía solar fotovoltaica.

Hasta hace unos años, el silicio se ha purificado para su uso mayoritario en la industria microelectrónica que abastecería con su material sobrante o no utilizado a la fotovoltaica. De esta forma estamos utilizando un silicio con una pureza correspondiente al grado semiconductor, mayor que la necesaria realmente en aplicaciones fotovoltaicas en las que es suficiente una pureza de grado solar [5]. Además, este silicio de grado solar, por lo tanto, tendría un menor coste de obtención que el silicio de grado semiconductor.

Sin embargo, pese al crecimiento de la industria fotovoltaica y al consiguiente aumento de las necesidades de material base, la industria del silicio no ha sido capaz de adaptarse a esta situación, viéndose incapaz de satisfacer las necesidades de la industria fotovoltaica y microelectrónica simultáneamente.

Así pues, a pesar de que la industria de células y paneles solares ha experimentado un fuerte aumento en su capacidad de fabricación y en la demanda creciente de paneles solares, empiezan a manifestarse los efectos de la carencia de materia prima. Incluso se han paralizado nuevas ampliaciones de la capacidad de fabricación, enfrentándose algunas empresas a una reducción de la producción .

2.1.1. La situación en el mundo

La producción mundial de generadores fotovoltaicos ha experimentado un crecimiento constante en los últimos veinte años. La figura 2.2. muestra la potencia pico producida en Europa, Japón, EEUU y en el mundo. Se puede observar que las tasas de crecimiento de la potencia fabricada se disparan a partir de finales de los noventa, especialmente en Europa y Japón.

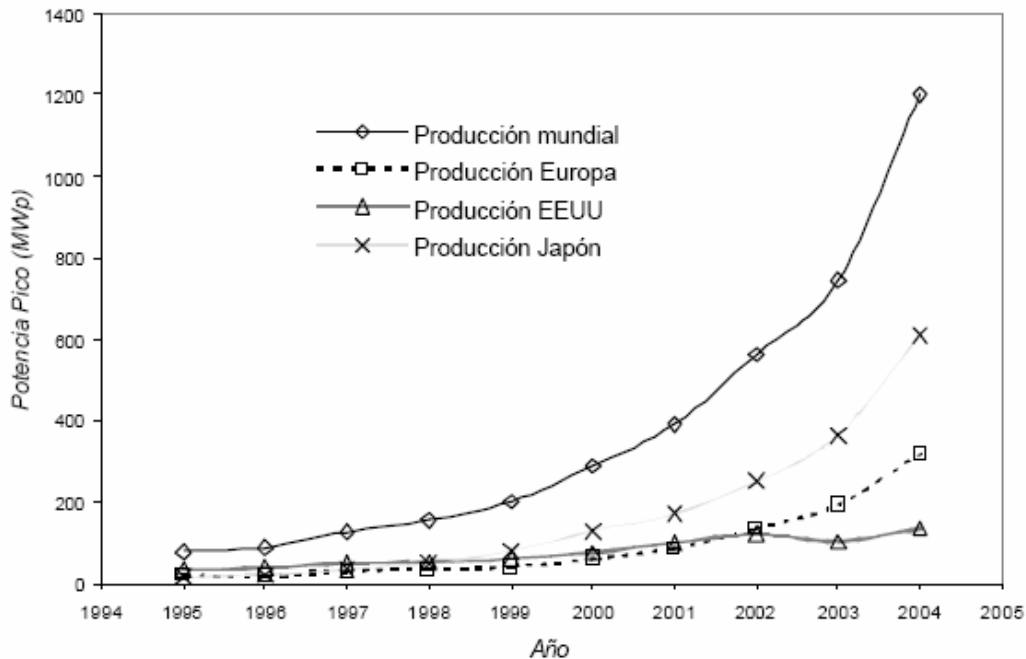


Figura 2.2. Producción mundial, europea, japonesa y estadounidense de paneles solares, expresada en MWp. (Fuente: PV News, marzo 2004/2005).

La prestigiosa revista PHOTON Internacional, estima que la demanda de energía fotovoltaica continuará creciendo, con tasas de 30 % a 40 % en el presente año y de al menos 30 % entre los años 2007 a 2010. La demanda en Japón crecerá entre un 20 % y un 30 % anualmente hasta el 2010, a pesar de la reducción de los incentivos gubernamentales. Se albergan perspectivas aun mejores en Alemania, con un crecimiento del 50 % en el presente año, un 40 % en el 2007 y al menos de un 30 % para el año 2010. En Estados Unidos y en el resto del mundo se estima que el crecimiento de la demanda de energía fotovoltaica será de al menos un 30 % hasta el año 2010. Países como España, Corea del Sur y China pueden jugar papeles importantes. En el caso de España se ha llegado a hablar de la siguiente Alemania, en lo que respecta al menos a tecnología y producción. En el caso de Corea del Sur existen planes para instalar una gran capacidad (1,3 GW para el 2011), mientras China continuará con su política de instalaciones rurales [2].

En cuanto a las tecnologías fotovoltaicas, se prevé que continúe en el futuro la situación basada en el uso del silicio policristalino y monocristalino como material semiconductor, que suponían un 89,5 % de la potencia fotovoltaica total [3].

Parece claro que la energía fotovoltaica se presenta como una de las fuentes energéticas que experimentará un desarrollo más acentuado tanto en el corto, como en el medio y largo plazo. Nuestro país debería jugar un importante papel en este campo, tanto en lo que respecta al desarrollo científico de esta fuente energética como a su producción e instalación, dentro y fuera de nuestras fronteras.

2.1.2. Planes europeos relativos a energía solar fotovoltaica

A partir de la década de los ochenta se desarrolla una intensa actividad normativa en la materia, haciendo más evidente la relación entre el incremento de producción industrial, el consumo de energía y la protección ambiental. Así a finales de 1997, fue adoptado por la Comisión Europea “El Libro Blanco de las Energías Renovables”, cuyo objetivo es definir las líneas de actuación para que las energías renovables lleguen a representar el 12% de la energía primaria consumida en la Unión Europea en el año 2010. Una parte esencial para conseguir este objetivo es “La campaña de despegue”. Esta campaña no pretende más que acelerar el desarrollo de la estrategia global en los primeros años.

El objetivo fijado para la energía solar fotovoltaica, principalmente enfocado hacia instalaciones conectadas a la red incorporadas a la estructura de edificios, es para el año 2010: 3 GWp instalados. La tecnología fotovoltaica debe ser considerada no solamente en función de su aportación energética, sino además y muy principalmente debe ir acompañando conceptos relacionados con el uso racional de la energía en edificios y considerada como parte del esfuerzo por reducir el consumo energético.

2.1.3. La situación en España

España es un país con altos niveles de radiación solar media, que pueden ser aprovechados con rendimientos muy favorables en la mayor parte del territorio nacional. Cuenta, además, con una industria fotovoltaica de primera línea a escala mundial. En 1998 se fabricaron equipos con capacidad para generar 12,5 MWp, disponiendo el sector con capacidad instalada para llegar a fabricar hasta 22,5 MWp. En 1996 los sistemas de producción de energía fotovoltaica instalados en España (considerando todos los equipos instalados en años anteriores) no llegaban a

contabilizar los 7 MWp, es decir, poco más de la mitad de los equipos fabricados en sólo un año.

Estos datos muestran una gran descompensación entre el potencial del medio físico y la capacidad tecnológica y el uso de este tipo de energía. De todos modos, debe destacarse que la evolución de la potencia fotovoltaica instalada ha experimentado un fuerte crecimiento a partir de 1993, año en que empezaron a operar programas de apoyo público, tanto a nivel de comunidades autónomas como de gobierno central.

La fabricación de módulos en España está, en su mayor parte, orientada al mercado exterior. Así, menos del 20 % de la producción se vende en España, el 50 % se exporta a países europeos y el 30 % restante se vende directamente fuera de las fronteras comunitarias. Incluso una parte de lo que se vende dentro de España es, a su vez, instalado fuera de nuestras fronteras a través de distribuidores o instaladores.

Igualmente, una parte de lo que se vende a otros países de la Unión Europea puede estar destinado a terceros países, por lo tanto la proporción de producto español exportado fuera de España es más del 85 %. La incidencia del producto español en el mercado de la Unión Europea es muy significativa, aunque ha ido disminuyendo, ya que hasta el año 2002 la fabricación de paneles fotovoltaicos en Europa estaba liderada por nuestro país, no obstante, en 2003 la producción española, que en 2002 doblaba a la alemana, pasa a equivaler la mitad de la producción alemana. En relación con la totalidad de la producción mundial, la producción española de módulos es aproximadamente el 7 %.

Respecto a la previsión de la situación de la instalación de sistemas de producción de energía fotovoltaica instalados, se prevé pasar de los 20 MWp actualmente instalados a más de 135 MWp para el año 2010. El marco de referencia para cumplir estas previsiones viene establecido por la Ley del Sector Eléctrico 54/1997, cuyo principal objetivo es la liberalización del sector eléctrico en España, los Reales Decretos 2818/1998 de 23 de Diciembre y 1663/2000 de 29 de Septiembre, la Resolución de la Dirección General de Política Energética y Minas (BOE de 21 de mayo de 2001) y el Plan de Fomento de las Energías Renovables y elaborado por la Secretaría de Estado de Industria y Energía del Ministerio de Economía y el Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético -IDAE.

El Consejo de Ministros, de 30 de diciembre de 1999, aprobó, en cumplimiento de la disposición transitoria decimosexta de la Ley del Sector Eléctrico, el Plan de Fomento de las Energías Renovables para el periodo 2000/2010, plasmando el compromiso del Gobierno español con el desarrollo del aprovechamiento energético de los recursos renovables.

Los objetivos del Plan, establecidos de acuerdo con la referida Ley 54/1997, señalan que en el año 2010, España deberá alcanzar el 12% del total de su demanda de energía, con fuentes renovables, lo que supone que más del 17% de la electricidad se generará con energías renovables y duplicar la participación de este tipo de recursos energéticos, respecto a la existente en 1998. Con ello, además, se da respuesta a una serie de compromisos internacionales adquiridos por el Estado Español en el marco del Protocolo de Kyoto y de conformidad con las directrices contempladas en el “Libro Blanco de las Energías Renovables” de la Unión Europea..

2.1.4. El problema del silicio

Como se ha mencionado anteriormente, el silicio hasta el momento utilizado en la fabricación de células solares fotovoltaicas procede, fundamentalmente, de las diferentes etapas del proceso de obtención del silicio empleado en la industria microelectrónica. Sin embargo, la industria fotovoltaica no necesita un grado de pureza tan elevado como el de las aplicaciones microelectrónicas.

El proceso de purificación de silicio empieza con la obtención de dióxido de silicio (SiO_2) a partir del mineral cuarcita. Mediante un proceso de reducción carbotérmica en un arco eléctrico, se obtiene el silicio de grado metalúrgico con una pureza de aproximadamente 98,5 %. Este silicio, utilizado en la industria química y del aluminio, continúa su proceso de purificación para conseguir una mayor pureza, apropiada para su uso en la industria microelectrónica. Este silicio es el denominado silicio de grado semiconductor caracterizado por una elevada pureza (99,999999 %). Suele presentarse con estructura policristalina, denominándose también polisilicio. En el ámbito mundial, existen siete empresas que producen el 90 % del polisilicio. Seis de ellas producen asimismo obleas (el paso previo a la célula solar) [4,5].

Puesto que la industria fotovoltaica no precisa de un silicio de tan alta pureza, una parte del silicio utilizado en la fabricación de células solares, hasta 1998 prácticamente la totalidad, procede del silicio que no cumplió todos los requerimientos del silicio de grado semiconductor (“off-spec silicon”), de los restos adheridos a los moldes de los lingotes, de los extremos de dichos lingotes, etc. [6,7]. Hasta 1998, para satisfacer las necesidades de la industria fotovoltaica eran suficientes de 2000 t a 3000 t anuales de “desperdicios” del silicio de grado semiconductor empleado por la industria microelectrónica.

Sin embargo, el crecimiento de la industria fotovoltaica, a velocidades de entre un 34 % hasta un 54 %, obligó a utilizar silicio no primario (una versión menos pura del silicio de grado semiconductor) e incluso silicio de grado semiconductor primario (la versión más pura del silicio semiconductor) [8]. La importante demanda de la industria

solar, alcanzó valores de 9000 t y 13000 t en 2003 y 2004, respectivamente. La magnitud que alcanza ese consumo, puede compararse con las 17000 t y 20000 t utilizadas por la industria microelectrónica en los mismos años [9]. Hay que tener en cuenta que la industria del silicio tenía en 2004 una capacidad de producción de unas 29000 t anuales. La diferencia entre lo consumido y lo producido se ha visto satisfecha con el reciclaje y aprovechamiento de restos de silicio, y con la reducción de las reservas de silicio que poseen las empresas. El problema consiste en que se estima que la industria fotovoltaica consumirá 21000 t en 2006, y este incremento de las necesidades supera la capacidad de producción de silicio que entrará en funcionamiento durante este año. Nuevamente, el resto del silicio habrá que obtenerlo del reciclaje, reservas de silicio y “desperdicios” del sector microelectrónico. Incluso si la demanda es mayor, la producción de paneles habrá de limitarse a crecer en un 30 % en 2006 [10]. Una estimación efectuada en el año 2002, probablemente demasiado discreta, predecía que la industria fotovoltaica precisaría entre 5600 t y 9900 t de silicio apto para el uso fotovoltaico hacia el año 2010, independientemente de la industria microelectrónica [4]. Más recientemente, la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA), basándose en una previsión de crecimiento anual de un 27 %, estimaba que para el año 2020 la demanda de polisilicio podría alcanzar 200000 t anuales (suponiendo un crecimiento del 27 %, una producción de células de 45 GW, con una necesidad de 6 g de silicio por vatio, en un mercado donde el 70 % de la producción partiría de silicio cristalino) [9]. Es decir, aún en un escenario modesto en comparación con la evolución de la industria fotovoltaica de los últimos años, es preciso un enorme esfuerzo para impulsar la “era solar” que se avecina, evitando un estancamiento debido a la carencia de polisilicio.

La posibilidad de fabricar paneles fotovoltaicos y, por tanto, de generar energía eléctrica a partir de la radiación solar depende de la disponibilidad de células solares. A su vez, sólo es posible fabricar células solares si se dispone de las obleas de silicio adecuadas. Así pues, el lento desarrollo de la capacidad de producción en algunos puntos de la cadena de fabricación de la industria fotovoltaica (obtención de silicio grado semiconductor o grado solar), supondrá la infrautilización de otras capacidades de esa cadena (obleas, células, paneles), junto con la imposibilidad de satisfacer las demandas de los clientes de la industria fotovoltaica. Esta situación será grave antes del año 2008 [2], puesto que ya en el presente año se están dando los primeros episodios de desabastecimiento.

En el ámbito mundial, se estima que en este año la producción de paneles oscilará entre 800 MW y 1,4 GW, es decir, entre una reducción de un 20 % o un aumento de un 30 %, respecto al año anterior. En cualquier caso, es seguro que la

capacidad de fabricación de muchas empresas no podrá alcanzar sus valores máximos en los próximos años, debido a la carencia material para fabricar obleas. La hipótesis más optimista supone que la situación podría empezar a mejorar hacia 2007 [2].

Se puede comprobar que hay un claro déficit en la cantidad de obleas disponibles. Sin embargo, el principal problema se encuentra en la carencia de silicio para la producción de obleas, que afecta a toda la cadena de producción. Incluso se están dilatando en el tiempo proyectos de fábricas de paneles solares a causa de la incertidumbre sobre la disponibilidad del material primario. Varios fabricantes de células y módulos han reducido el anunciado incremento de producción [2]. Un importante fabricante de polisilicio (Wacker) augura una grave carencia de material básico para el presente año, que estima en 4000 t suponiendo un moderado crecimiento de la industria fotovoltaica de un 20 % anual. Esta situación supondría una reducción en la producción de paneles solares de 300 MW en 2006 [10].

La industria fabricante de polisilicio mantiene una política de prioridades que favorece a la industria microelectrónica. Por un lado, debido a una tradición comercial que considera a la industria fotovoltaica de reciente incorporación y por lo tanto poco fiable. Y por otra parte, debido a la carencia de un compromiso de adquisición a largo plazo de polisilicio por parte de los fabricantes de lingotes y obleas para uso fotovoltaico [2]. A pesar de ello, la industria del polisilicio está expandiendo su capacidad de producción, que podrá utilizar hacia 2007. Aunque, el crecimiento de la industria fotovoltaica llegaría a un estancamiento en dos o tres años, debido a su carencia [9].

En lo que se refiere a la producción mundial de silicio grado solar, los analistas estiman que la expansión de la capacidad de producción de los fabricantes de silicio alcanzaría unas 10000 t adicionales hacia finales de 2007 [2]. Si se alcanzara este valor, es posible que se satisfagan las necesidades del año 2007.

Algunas empresas fabricantes de lingotes y obleas han firmado con sus clientes contratos con incrementos del 50 % en la cantidad de producto suministrado. Se estima que una expansión realista de estas empresas se situaría en torno al 30 % para el año 2006. Aunque el suministro de silicio para estas fábricas de lingotes y obleas parece asegurado hasta 2006, hay que tener en cuenta que la carencia de silicio ha supuesto el retraso en el aumento de capacidad de producción de algunas de estas empresas. De este modo, pese a la existencia de contratos de suministro de silicio, se han registrado casos de retrasos e incumplimientos de suministro de obleas, especialmente para pequeños fabricantes de células. Paradójicamente, debido a los planes de incremento de capacidad de producción de lingotes y obleas, se espera un

exceso en la capacidad de producción hasta que se resuelvan los problemas de suministro de silicio [2].

Debido a la limitación de la capacidad de suministro de obleas, los planes de expansión de las fábricas de células fotovoltaicas están sufriendo el consiguiente retraso.

Resulta evidente que la solución a esta barrera para el desarrollo de la industria fotovoltaica se ha de basar en la producción de polisilicio no primario, o en el desarrollo y producción de silicio de grado solar. España juega un papel importante en ese eslabón de la cadena de producción fotovoltaica, apostando por la producción de silicio grado solar.

2.2. PRODUCTO Y MATERIAS PRIMAS

El objetivo de este proyecto es obtener **silicio de grado solar**, cuya principal especificación es una pureza mínima de 99,99 % en silicio, siguiendo el procedimiento correspondiente al proceso Siemens en el que la materia prima principal es el silicio de grado metalúrgico.

El **silicio de grado metalúrgico** se obtiene por reducción carbotérmica de sílice. El silicio de grado metalúrgico, también llamado silicio metal, con una pureza típica de 98,5 % de silicio, se produce en hornos con arco eléctrico sumergido. En principio, este proceso fue desarrollado para la obtención de ferrosilicio y de otras aleaciones.

El silicio es liberado de acuerdo con la siguiente reacción:



El horno, abierto y rotatorio, consta esencialmente de un crisol relleno de cuarzo y carbón. La mezcla de las materias primas es calentada a una temperatura entre 1900 y 2100 °C por un intenso arco eléctrico, mantenido entre los extremos de tres electrodos sumergidos y el material eléctrico situado en la parte inferior del horno. Aunque existen importantes excepciones, en la práctica este proceso suele utilizar corriente trifásica y una potencia eléctrica de trabajo entre 10 y 30 MW. Los electrodos normalmente son de carbón. La mezcla de materias primas se carga por la parte superior, teniendo lugar además las siguientes reacciones:



El silicio metal en estado líquido se deposita en el fondo del horno. El efluente gaseoso, que arrastra partículas de sílice amorfa de menos de 1 μm, se hace pasar a través de filtros adyacentes al horno. La sílice amorfa recogida tiene aplicación como aditivo para hormigones y materiales refractarios. Dependiendo de la calidad de las materias primas y las condiciones de operación, el rendimiento a silicio de grado metalúrgico oscila entre 80 y 90 %.

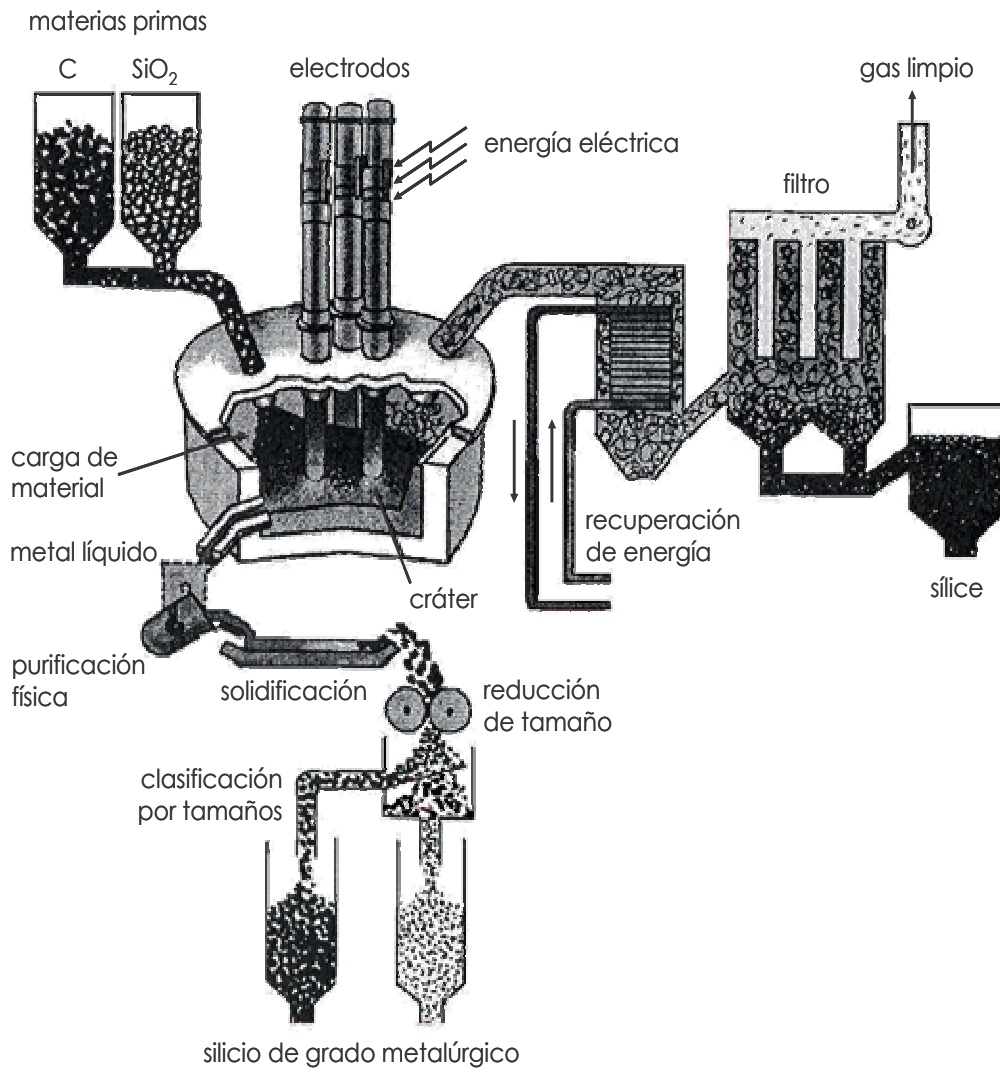


Figura 2.3. Representación esquemática del proceso de reducción carbotérmica de sílice para obtener silicio de grado metalúrgico.

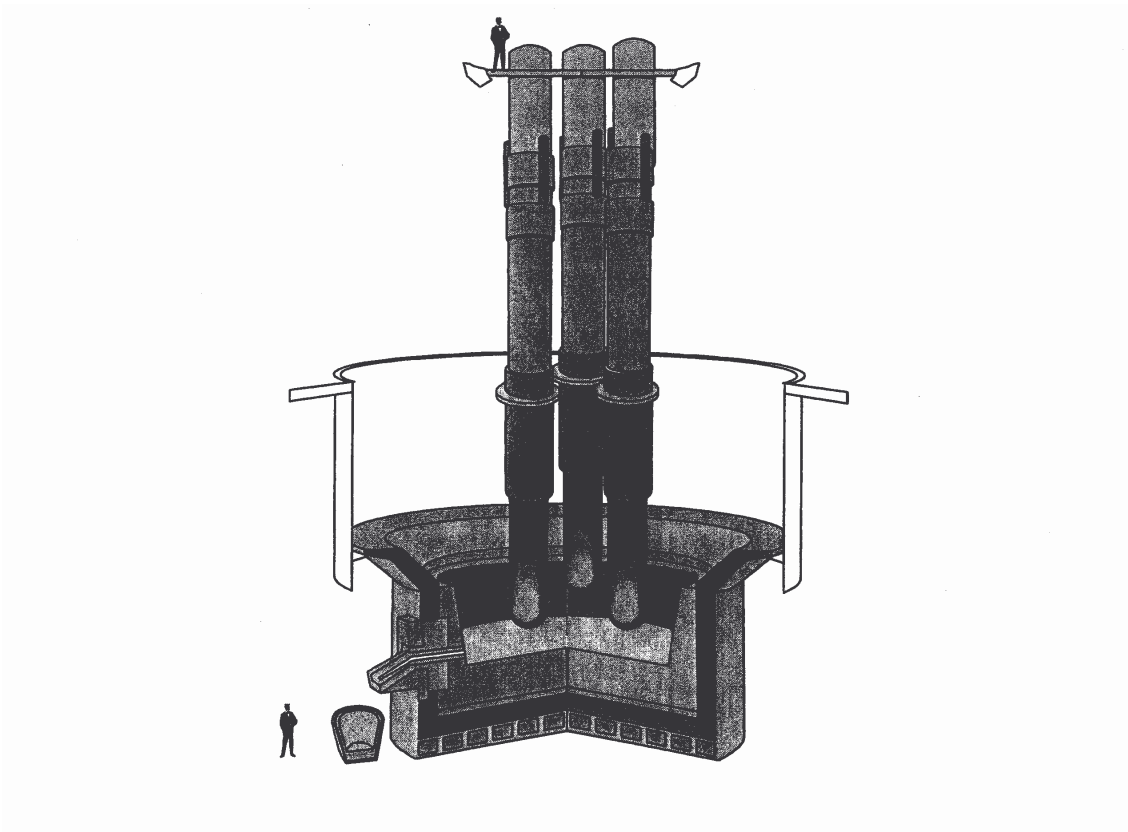


Figura 2.4. Esquema y comparación de las dimensiones de un arco eléctrico de electrodos sumergidos.

El silicio fundido que se obtiene contiene de 1 a 3 % de impurezas, dependiendo de las materias primas y del tipo de electrodo. Las principales impurezas son:

Fe: 0,2 – 1 %

Al: 0,4 – 0,7 %

Ca: 0,2 – 0,6 %

Ti: 0,1 – 0,02 %

C: 0,1 – 0,15 %

El silicio de grado metalúrgico es el punto de partida para la obtención de silicio de grado solar.

En este proyecto el silicio de grado metalúrgico será proporcionado por la empresa Ferroatlántica, perteneciente al grupo Villar Mir. Ferroatlántica es la segunda productora europea de silicio de grado metalúrgico, detrás de la empresa noruega Elkem. El silicio que suministra tiene una pureza de 98,5 % y el siguiente análisis químico:

Tabla 2.1. Análisis químico típico del silicio metálico.

Elementos	Grado estándar	Grado metalúrgico	Alta pureza
% Si (mínimo)	98,50	98,50	99,00
% Fe (máximo)	0,50	0,40	0,20
% Al (máximo)	0,50	0,25	0,02
% Ca (máximo)	0,40	0,03	0,03

Tabla 2.2. Análisis químico típico de otros elementos habituales en el silicio metálico.

Elementos	P	C	S	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb
% (valor medio)	0,0050	0,030	0,0020	0,0030	0,0010	0,0003	0,0004	0,0006

Su granulometría habitual oscila entre 10 y 100 mm:

Tabla 2.3. Intervalos granulométricos habituales

0 – 3 mm
1 – 25 mm
10 – 100 mm



El silicio es suministrado a granel o en grandes bolsas de una tonelada, en función de lo que solicite el cliente.

2.3. PROCEDIMIENTO Y CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

La obtención de silicio de grado solar se puede llevar a cabo a través de diferentes rutas. Las dos principales se diferencian en que una de ellas utiliza SiHCl_3 como fuente de silicio y la otra utiliza SiH_4 .

El proceso más extendido y desarrollado es el que parte de SiHCl_3 , y se llama **proceso Siemens**. El proceso Siemens se puede esquematizar de la siguiente forma:

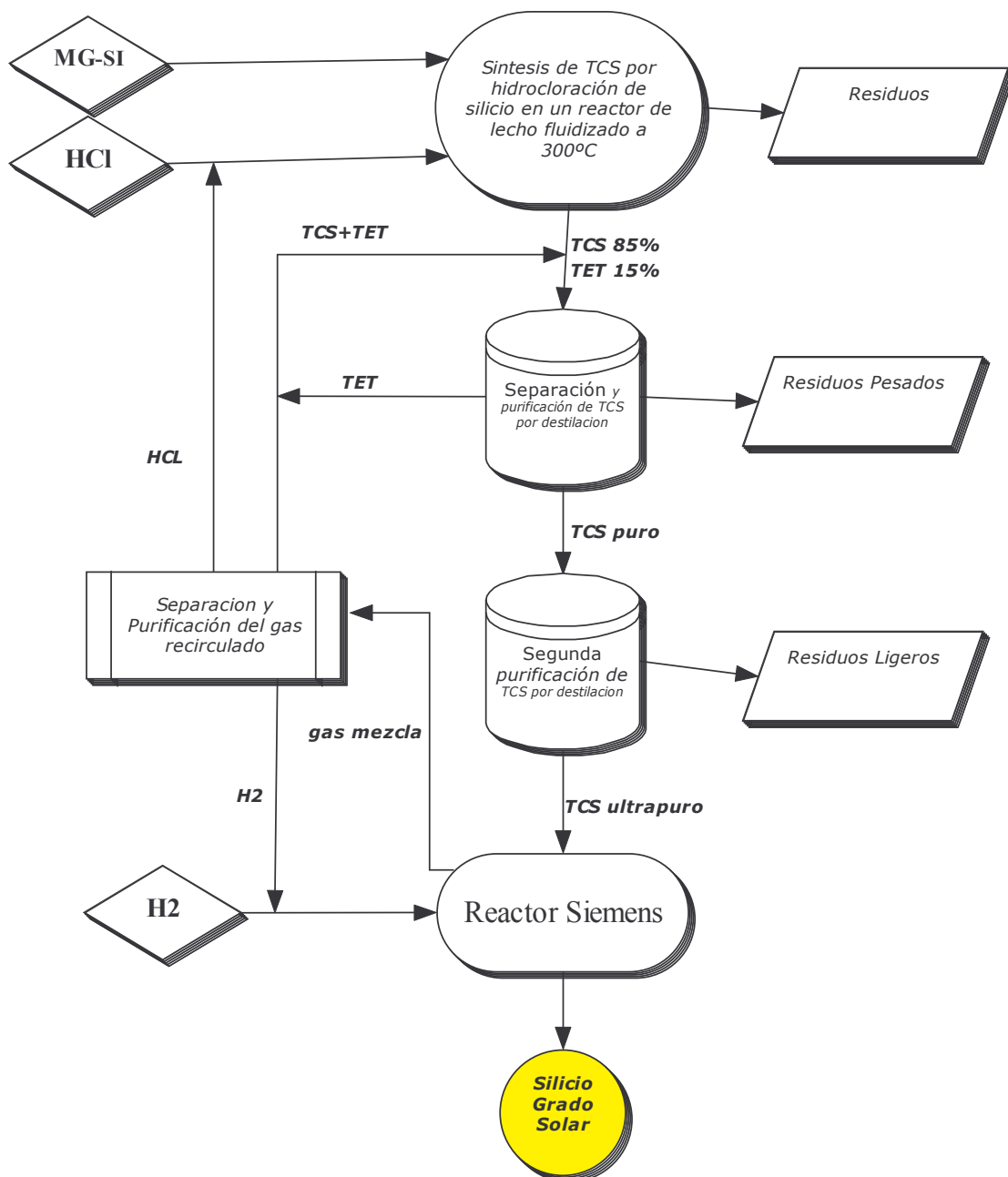


Figura 2.5. Representación esquemática del Proceso Siemens, donde TCS = SiHCl_3 y TET = SiCl_4

El triclorosilano se prepara por hidroclicación del silicio de grado metalúrgico en un reactor de lecho fluidizado:



Esta reacción transcurre a aproximadamente 300 °C y normalmente sin catalizador. Una reacción que compite con ésta es:



que contribuye a la formación de tetracloruro de silicio, producto secundario no deseado, en una proporción de 10 a 20 % molar. Otras reacciones secundarias que se dan en menor extensión, conducen a la formación de cloruros derivados de las impurezas del silicio de grado metalúrgico y a la formación de diclorosilano.

Se elige el triclorosilano por su alto grado de deposición, su bajo punto de ebullición (31,8 °C) y su volatilidad, relativamente alta, que facilita su purificación con respecto al boro y al fósforo hasta niveles de partes por billón. De este modo, el triclorosilano pasa por dos etapas de purificación por destilación fraccionada. En la primera etapa se eliminan los componentes más pesados que el triclorosilano, y en la segunda los más ligeros o volátiles.

El SiHCl₃ purificado se vaporiza y diluye con hidrógeno de elevada pureza introduciéndose en un reactor de deposición de acero inoxidable. La corriente gaseosa se descompone sobre la superficie de 30 ó más varillas de silicio con forma de U–invertida calentadas eléctricamente a aproximadamente 1100 °C. Éstas actúan a modo de “semillas” sobre las que se deposita el silicio ultrapuro, creciendo bajo la forma de grandes barras.

Las principales reacciones son:



La corriente gaseosa de subproductos de la reacción que abandona el reactor contiene H₂, HCl, SiHCl₃, SiCl₄ y SiH₂Cl₂.

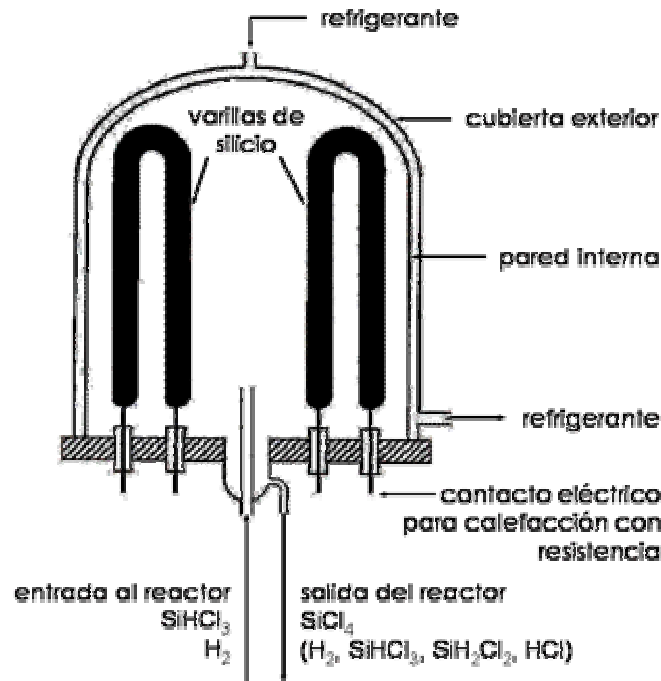


Figura 2.5. Representación esquemática de un reactor Siemens tradicional.

Para evitar la deposición sobre la superficie interior de la cámara de reacción, ésta tiene que estar fría.

Como muestran las reacciones y los equilibrios anteriores, en el proceso de deposición se generan subproductos. Desafortunadamente, por cada mol de silicio convertido a polisilicio, de 3 a 4 moles se convierten en tetracloruro de silicio. La principal aplicación industrial de este compuesto es la producción de sílice pirogénica, o su transformación en triclorosilano mediante alguno de los siguientes procesos:

- Reducción a alta temperatura de SiCl_4 con hidrógeno:



- Hidrogenación de SiCl_4 en un lecho de silicio de grado metalúrgico:



El segundo proceso más extendido es el que parte de silano, y se denomina **proceso Union Carbide**. Un esquema representativo del proceso sería el siguiente:

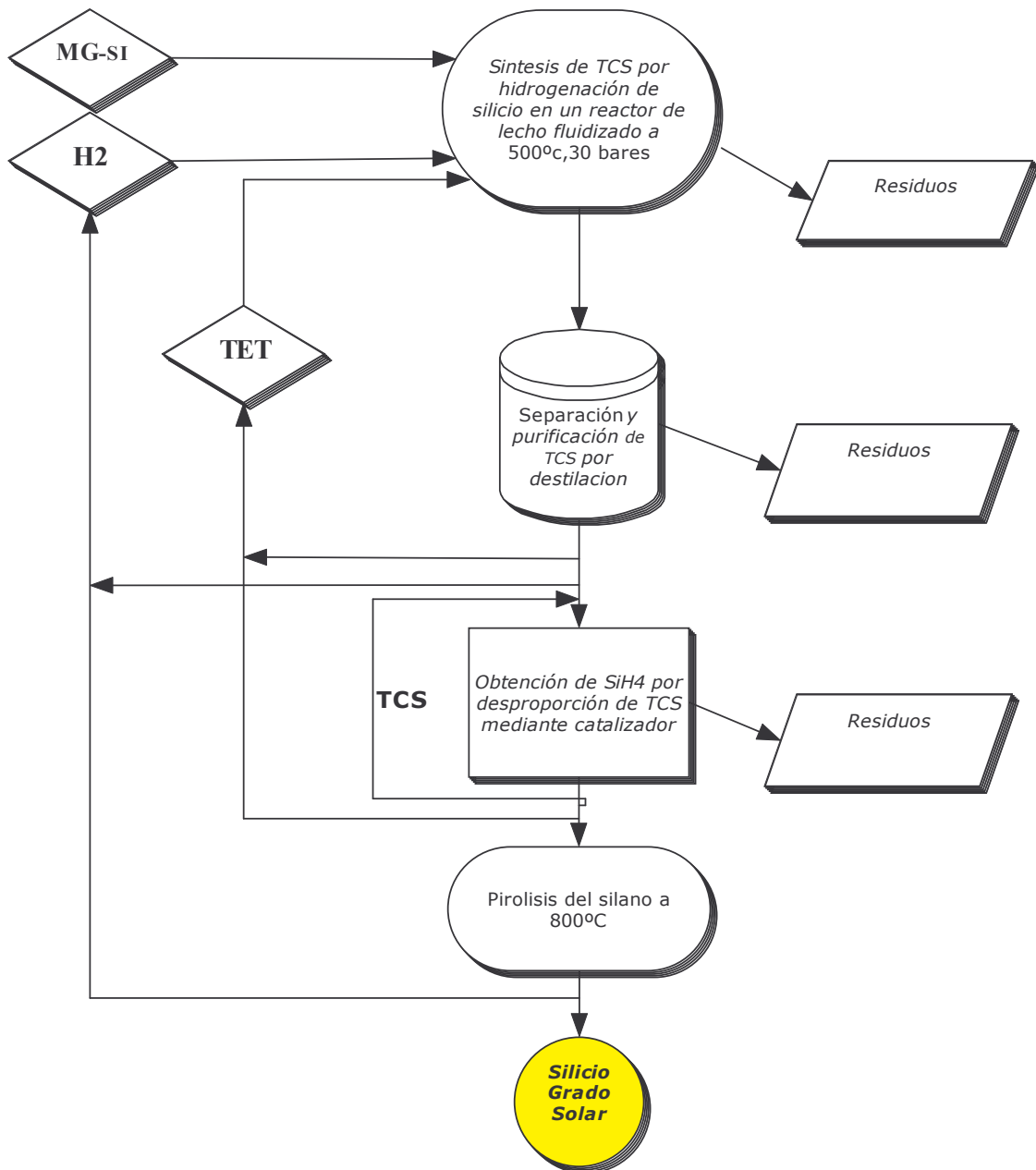
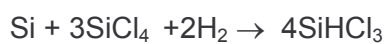


Figura 2.5. Representación esquemática del Proceso Union Carbide, donde TCS = SiHCl₃ y TET = SiCl₄

El triclorosilano se obtiene por hidrogenación de tetracloruro de silicio en un reactor de lecho fluidizado con silicio de grado metalúrgico, a 500 °C y 30-40 bares:



[2.10]

El triclorosilano se separa y purifica por varias fases de destilación y a continuación es redistribuido en dos etapas que transcurren a través de columnas de destilación, en las que el relleno es una resina de amonio cuaternario que actúa como catalizador de las siguientes reacciones:



El tetracloruro de silicio y el triclorosilano separados se recirculan al reactor de hidrogenación y a la primera etapa de redistribución, respectivamente. El silano purificado se lleva a un reactor donde tiene lugar su pirólisis para obtener polisilicio a una temperatura de entre 800 y 850°C: [



El hidrógeno obtenido se recircula al reactor de hidrogenación.

Otro proceso de obtención de polisilicio es el **proceso Ethyl Corporation**, que utiliza tetrafluoruro de silicio que es un producto residual en la industria de los fertilizantes. Por lo tanto, parte de una materia prima con muy bajo coste. El tetrafluoruro de silicio se hidrogena a silano utilizando hidruros metálicos tales como el hidruro de litio, aluminio o sodio–aluminio. Después, el silano se purifica por destilación y se descompone térmicamente a polisilicio igual que en el proceso Union Carbide.

Actualmente el 80% del silicio policristalino se produce usando el proceso Siemens y un 20% usando el proceso Union Carbide, en los últimos años se han desarrollado nuevos procesos para superar las limitaciones y desventajas de estos procesos como son su alto consumo energético, su alta complejidad y el riesgo ecológico que supone el trabajar con compuestos clorados.

La elección del proceso Siemens para realizar el presente proyecto corresponde a una serie de factores:

En relación con el proceso Union Carbide, las condiciones de operación (presión y temperatura) son superiores con respecto al proceso Siemens y por lo tanto energéticamente más caro.

El segundo factor de elección corresponde a que, aunque este proceso se ha utilizado principalmente en la obtención de polisilicio de grado electrónico, es el

procedimiento con la tecnología más desarrollada y asentada, y del que se dispone de mayor cantidad de información.

Este proyecto consiste en el diseño de una planta para la obtención de 250 kg/día de silicio de grado solar a partir de silicio de grado metalúrgico, siguiendo el proceso Siemens. Entonces, en términos de **capacidad de producción**, se requiere purificar aproximadamente 1000 t/año de triclorosilano.

2.4. EMPLAZAMIENTO

2.4.1. Elección del emplazamiento

En cualquier iniciativa que se pueda plantear sobre la creación de una nueva fábrica, planta química, o bien, la ampliación de una actuación ya existente, merece un tratamiento muy especial la elección del posible emplazamiento de la misma. Se debe prestar un cuidado sustancial a la hora de elegir la ubicación adecuada de las instalaciones, teniendo en cuenta, sobre todo, un conjunto de factores que, con mayor o menor peso marcarán firmemente unas claras directrices para la ubicación final de la instalación correspondiente.

En este caso concreto se trata de elegir un emplazamiento para la instalación de la planta de la que forma parte la unidad a diseñar en este proyecto. Esta planta debe ubicarse lo más cerca posible del lugar en el que se va a utilizar el silicio de grado solar para la fabricación de células y paneles solares. En España se ubican tres empresas de este sector: Isofotón, Atersa y BP Solar. Entre ellas la más importante es **Isofotón**, elegida como cliente principal de la planta a diseñar en este proyecto.

En Isofotón se lleva a cabo todo el proceso de fabricación de células y paneles solares fotovoltaicos, desde la obtención de obleas a partir de lingotes de silicio hasta la fabricación de células y el ensamblado de paneles. Desde 1997 Isofotón ha mantenido un crecimiento sostenido en su volumen de negocio [12].

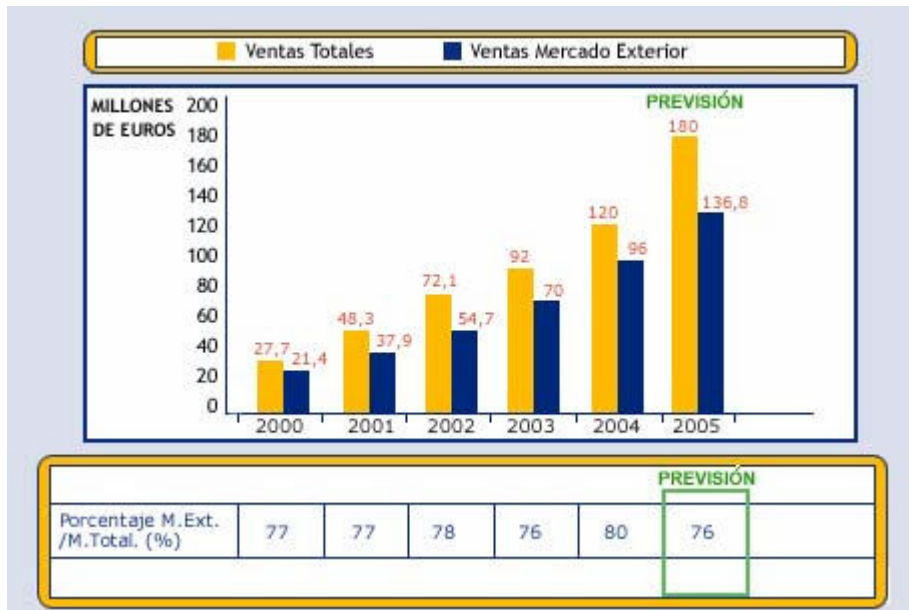


Figura 2.6. Volumen de negocio de Isofotón en el periodo 2000–2005.

En cuanto al ranking de empresas generadoras de MW fotoeléctricos, en el año 2004 Isofotón se situó como la novena empresa con mayor producción a nivel mundial y la segunda empresa a nivel europeo [12].



Figura 2.7. Ranking de compañías productoras de paneles fotovoltaicos a nivel mundial y europeo en el año 2004.

Se ha decidido ubicar la planta lo más cerca posible de la empresa que consumirá el producto final, es decir, Isofotón. En base a esto se ha realizado un breve análisis del emplazamiento elegido.

La fábrica actual de Isofotón se encuentra situada en el Parque Tecnológico de Andalucía, donde también se ha decidido instalar la planta de obtención de silicio de grado solar.

El Parque Tecnológico de Andalucía está ubicado en la ciudad de Málaga, situada estratégicamente en la costa sur de España, que se caracteriza por su atractiva topografía, un envidiable clima mediterráneo con una temperatura media anual de 18,2 ° C y más de 3000 horas anuales de sol, y una gran variedad de ofertas deportivas y, en general, de ocio producto de su gran infraestructura turística.

Málaga capital y, principalmente, la zona situada en su valle del río Guadalhorce tienen, gracias a las nuevas comunicaciones viarias este-oeste y norte, buen acceso a las redes de comunicación con el resto del país. En este emplazamiento se instalan cada vez más empresas dedicadas a las actividades industriales y de servicios, que contribuyen a crear una potente infraestructura industrial. Su aeropuerto proporciona conexiones directas con toda Europa, América y algunas ciudades de otros continentes (más de 12 millones de pasajeros en el año 2004). El puerto turístico y comercial representa una ventaja para aquellas empresas con intereses en los mercados mediterráneos y norteafricanos. A escasa distancia por carretera se encuentra, además, el puerto de contenedores de Algeciras que es el mayor de España.

El Parque Tecnológico de Andalucía tiene una ubicación estratégica privilegiada, al estar situado a 13 Km. del centro de Málaga, a 7Km. del Campus Universitario y a 6Km. del Aeropuerto Internacional de Málaga [11].

Se ha consultado la disponibilidad de parcelas en el Parque Tecnológico de Andalucía y la respuesta obtenida ha sido positiva. En concreto, la parcela contigua a la fábrica de Isofotón está disponible con una extensión total de 30000 m², suficiente para la planta que se prevee instalar. Como otra ventaja adicional la sociedad gestora del Parque Tecnológico de Andalucía ofrece un servicio de asesoramiento gratuito para facilitar la implantación de las empresas en el Parque Tecnológico

En la siguiente figura se muestra la distribución de parcelas en el Parque Tecnológico de Andalucía, así como la situación exacta tanto de Isofotón como de la futura planta.



Figura 2.8. Ubicación de Isofotón y de la planta de obtención de silicio de grado solar en el Parque Tecnológico de Andalucía (Málaga).

2.4.2. Plano de implantación

Se denomina implantación o “layout” a la disposición en planta en el terreno de todos los elementos, tanto principales como auxiliares, necesarios para realizar una actividad.

El estudio de implantación de una planta de nueva construcción afecta no sólo a los elementos y máquinas del proceso sino también a todos los servicios auxiliares, de cualquier índole, que hacen posible la fabricación en toda su extensión, incluida la atención de todos los requisitos sociales impuestos por los trabajadores.

Los objetivos que se persiguen con el estudio de la implantación de una planta industrial son:

- Minimizar la inversión en equipos.
- Minimizar el tiempo total de producción.
- Utilizar el espacio de la manera más eficaz.
- Disponer los medios para el máximo confort y seguridad del personal.
- Minimizar el coste de manipulación de materiales.
- Minimizar la diversidad de tipos de equipo.
- Facilitar el proceso productivo.

El resultado de la conjunción de todos estos objetivos se representa, finalmente, en el llamado *plano de implantación*.

Para una primera aproximación, se consideró la existencia de:

- Salas de administración.
- Salas de usos múltiples: comedor, vestuarios, servicios...
- Sala de control.
- Aparcamientos de turismo.
- Aparcamiento de carga y descarga.
- Control de seguridad de entrada y salida.
- Sección de acondicionamiento de materias primas.
- Sección de síntesis.
- Sección de separación.
- Sección de deposición.
- Sección de almacenamiento de materias primas y productos secundarios.

Conocidos los elementos que se debían incluir, se hizo un boceto general y se determinaron las diferentes parcelas dentro del terreno. Dentro de cada sección se

estudiaron los equipos que debían ser ubicados en su interior, y las distancias de seguridad mínimas que debía cumplir cada uno de ellos. De este modo se calculó el área aproximada de cada una de estas parcelas y la distancia que debía existir entre ellas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se localizaron las diferentes secciones y se ubicaron los equipos más importantes, de tal manera que:

- Los edificios donde hay trabajadores se sitúan en un extremo de la planta, y tienen una puerta de emergencia cercana.
- La zona de almacenamiento de materias primas se sitúa de modo que, está lo más cerca posible del lugar de utilización de dichas materias primas y, al mismo tiempo, cerca de un acceso a la planta para que los camiones de carga y descarga no tengan que atravesarla para llegar hasta esta sección.
- El aparcamiento de turismos, para mayor comodidad, se localiza cerca de la entrada principal y del edificio de administración.
- El aparcamiento de vehículos de transporte se localiza cerca de la sección de almacenamiento.
- Las vías en el interior son dobles y de doble sentido con un módulo de 3,5 m por cada carril.
- Cada sección y cada edificio cuenta con una acera asfaltada a su alrededor. El módulo utilizado fue de 0,75 m.
- La instalación eléctrica que suministra la energía a toda la planta es subterránea.
- La sala de control se localiza de tal manera que desde ella existe un control visual de todas las secciones.

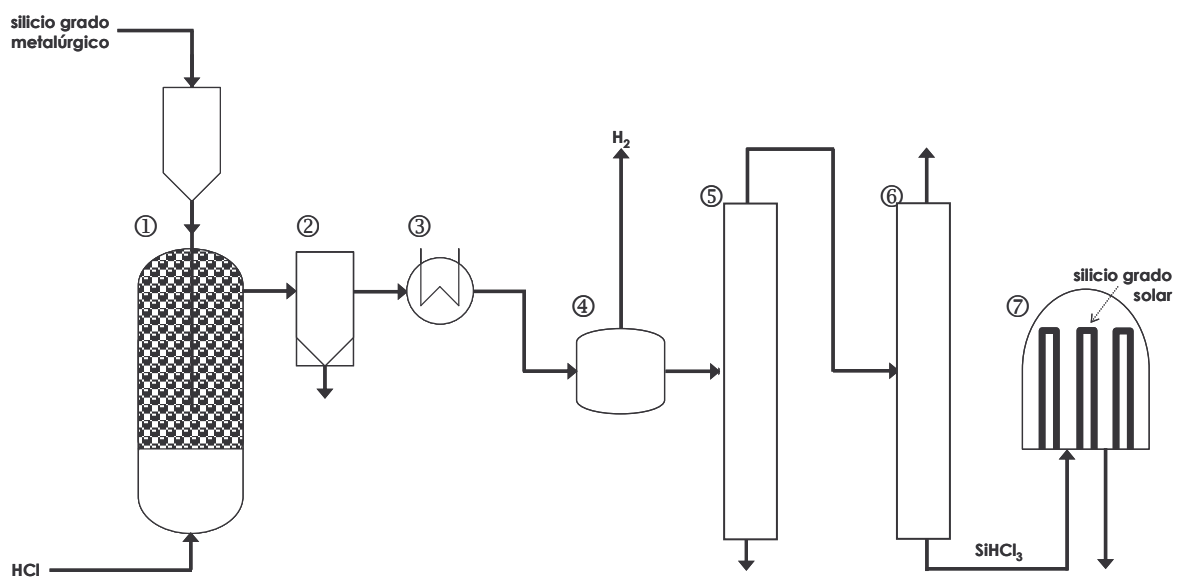
Atendiendo a todos estos criterios, la disposición de las secciones es la que se muestra en el plano nº1.

3. MEMORIA TÉCNICA

3.1. INGENIERÍA DE PROCESOS

3.1.1. Procedimiento

A continuación se ofrece una descripción más detallada del proceso Siemens, en el que se incluyen las unidades objeto de diseño en este trabajo.



- | | |
|--|--|
| 1. Reactor de síntesis de clorosilanos | 5. Columna de destilación (compuestos pesados) |
| 2. Separador gas/sólido | 6. Columna de destilación (compuestos ligeros) |
| 3. Condensador parcial | 7. Reactor de deposición de silicio de grado solar |
| 4. Separador gas/líquido | |

Figura 3.1. Esquema del proceso Siemens para la obtención de silicio de grado solar.

La primera etapa consiste en la síntesis de triclorosilano a partir de silicio de grado metalúrgico y cloruro de hidrógeno:



En esta etapa se obtiene una corriente que abandona el reactor a aproximadamente 300 °C y contiene:

- HCl no reaccionado: 2–50 % molar.
- H₂, SiCl₄ y SiHCl₃: 50–98 % molar.
- SiH₂Cl₂, en una proporción muy baja, pero que hay que tener en cuenta porque se trata de obtener una corriente de triclorosilano en la que el nivel de impurezas sea muy bajo.
- Otras impurezas:
 - Partículas de silicio en polvo: 1–5 % en peso relativo a la cantidad de clorosilanos.
 - Cloruros metálicos (PCl₃, AlCl₃, BCl₃...): 0,1–4 % en peso relativo a la cantidad de clorosilanos.
 - Hidruros (BH₃, AsH₃...): contenido despreciable.
 - Siloxanos: contenido despreciable.
 - Polisilanos: contenido despreciable.

Los productos mayoritarios son el triclorosilano y el tetracloruro de silicio, que aparecen en una proporción SiHCl₃:SiCl₄ = 85 mol:15 mol.

En la segunda etapa se eliminan los sólidos, principalmente partículas de silicio en polvo, que provienen de la disminución de diámetro producto de la reacción del silicio.

Las posibles alternativas ([14,15,16]) son:

- Ciclones con una disposición en serie o multiciclón.
- Filtros de placas a presión, que utilizan metales sinterizados o cerámicas (poroplate®, fuji-plate®...) como material filtrante.
- Combinación de ciclones y filtros.

En esta etapa la alternativa más adecuada es la combinación de ciclones y filtros al garantizar la separación de, prácticamente, todas las partículas sólidas. A la salida de la filtración se tiene dos efluentes:

- Sólido: partículas de silicio en polvo, cloruros metálicos (CaCl₂, FeCl₃...).
- Filtrado: H₂, HCl, SiCl₄, SiHCl₃, SiH₂Cl₂, impurezas (cloruros metálicos, hidruros, siloxanos, polisilanos).

Consideramos el rendimiento de la operación de separación de sólidos prácticamente del 100%

La corriente de *filtrado* pasa a la tercera etapa que incluye un condensador parcial, en el que se reduce la temperatura de la corriente de 300 a 25 °C aproximadamente, y una cuarta etapa formada por un separador gas/líquido, en el que se separan los gases no condensables de la corriente, principalmente el H₂.

La corriente en fase líquida que abandona el separador anterior, se lleva a la entrada de la quinta etapa y posteriormente de la sexta que lo constituiría un sistema formado por dos columnas de destilación. Estas columnas se utilizan para la separación y purificación del SiHCl₃. La configuración más apropiada según la bibliografía [17,21], es aquella en la que en la primera columna se eliminan los compuestos más pesados que el SiHCl₃, y en la segunda columna los más ligeros.

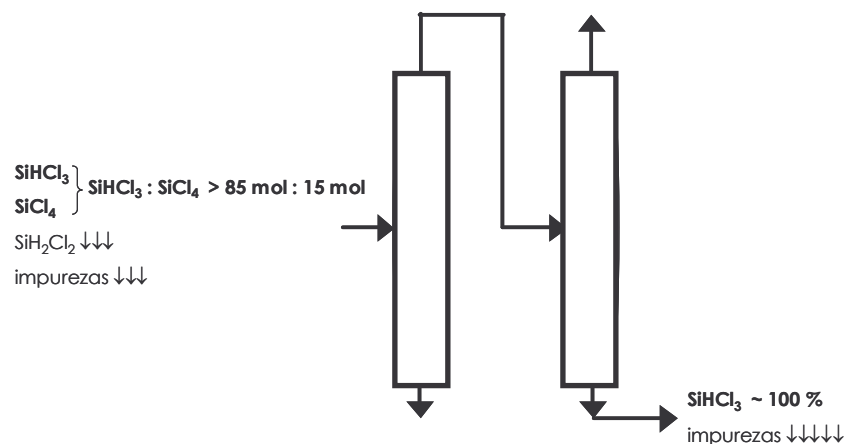


Figura 3.2. Corrientes de entrada y salida de la unidad de destilación.

Si el nivel de impurezas en la corriente de SiHCl₃ que abandona la unidad de destilación no es lo suficientemente bajo como para poder utilizarla en la obtención de silicio ultrapuro, entonces puede ser necesario recurrir a alguna etapa de purificación adicional. En bibliografía se han encontrado diferentes alternativas:

- Eliminación de impurezas de As y P (también de B y S) mediante la utilización de yodo. Estas impurezas de As y P pueden encontrarse, al menos en parte, bajo la forma de H₂PCI, HPCI, H₂AsCl, HAsCl₂... Se cree que el yodo puede reaccionar con tales compuestos para dar otros con puntos de ebullición superiores a los de las impurezas originales y

los clorosilanos, por lo que se pueden separar fácilmente. En el caso del SiHCl_3 , el yodo reacciona muy lentamente con su enlace Si–H. De hecho, un exceso de yodo no es perjudicial porque, además, éste se volatiliza rápidamente durante la conversión del clorosilano a silicio. Se consigue reducir el nivel de impurezas hasta <1 ppb de As y <1 ppb de P. En la práctica industrial el SiHCl_3 se puede purificar añadiendo yodo elemental a la caldera de la columna de destilación, en una proporción de 0,001 a 0,1 % en masa de yodo relativa a la cantidad de clorosilanos [22].

- Eliminación de impurezas metálicas de B, As, Al, P, Sb e impurezas orgánicas mediante adsorción:
 - Con resinas de intercambio aniónico, insolubles en los clorosilanos y con grupos polares amonio cuaternarios ($-\text{NR}_3\text{Cl}$) o aminas terciarias ($-\text{NR}_2$). Algunas de las muchas resinas comerciales que se pueden utilizar son las resinas Amberlita y Dowex. A temperatura ambiente pueden llegar a eliminar hasta 2 mg de impurezas de B y Al por gramo de resina [23].
 - Con AlF_3 y/o MgCl_2 anhidro de gran superficie específica (>100 m^2/g) y/o resinas de intercambio catiónico. A temperatura ambiente se puede llegar a eliminar hasta 1 mg de impurezas de P, As y Sb por gramo de AlF_3 , o hasta 800 mg de las mismas impurezas por gramo de MgCl_2 anhidro [24].
 - Con carbón activado que, a temperatura ambiente, puede llegar a eliminar hasta 15 mg de impurezas orgánicas por gramo de carbón activado [25].
- Eliminación de impurezas de B, P y As mediante la dispersión uniforme de partículas coloidales, resultado de la hidrólisis parcial de algún clorosilano de la corriente líquida de clorosilanos a purificar. En este proceso las impurezas se combinan con los productos de hidrólisis, para cuya obtención se debe utilizar una cantidad de vapor de agua suficiente como para que no todos los clorosilanos se conviertan en estos productos no deseados. Con cantidades de vapor de agua $<0,05$ % volumen con respecto al volumen total de clorosilanos, se puede llegar a cantidades $<0,05$ % molar de clorosilanos convertidos en productos de hidrólisis no deseados. El vapor de agua se utiliza suspendido en un gas inerte portador (N_2 , Ar, CO_2 o CH_4). Las impurezas se combinan con las partículas coloidales de estos

compuestos de hidrólisis, formando estructuras químicas complejas con puntos de ebullición mayores que los de los clorosilanos de los que se pueden separar con facilidad mediante destilación. Se puede reducir el nivel de impurezas de B hasta <0,25 ppb [26].

La corriente de SiHCl_3 purificado se alimenta al reactor de deposición donde, a $1100\text{ }^\circ\text{C}$, se diluye con H_2 y se descompone a silicio de grado solar de acuerdo con las siguientes reacciones:



3.1.2. Corriente de entrada a la sección de separación

El diagrama de bloques del proceso es el siguiente:

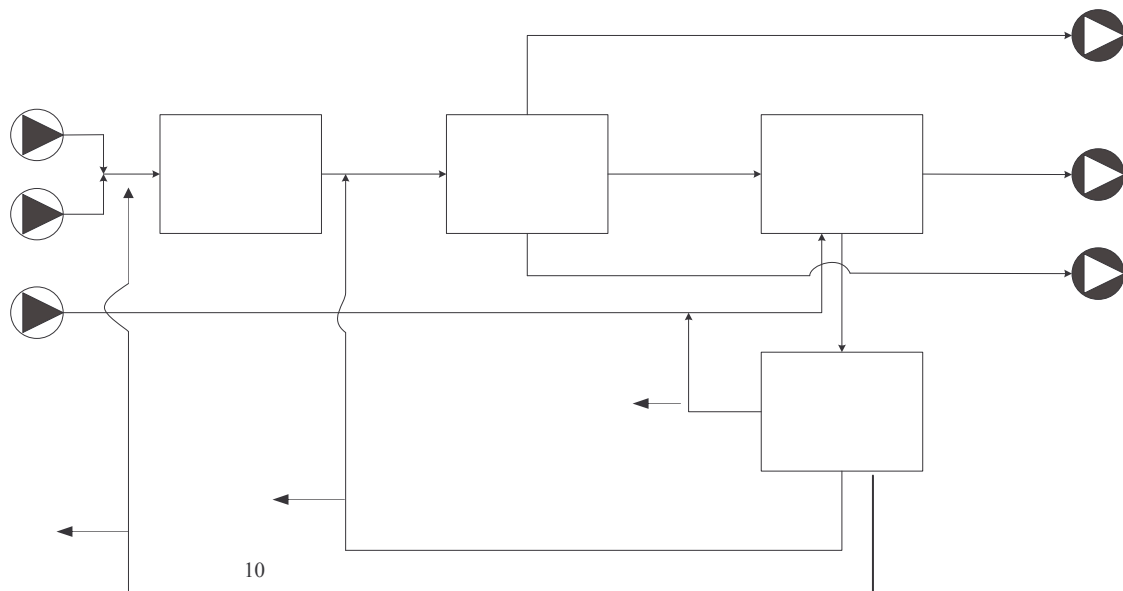


Figura 3.3. Diagrama de bloques del proceso.

El objetivo es obtener al final de todo el proceso una producción de 250 kg/día de silicio de grado solar. Para ello se ha hecho un cálculo preliminar, utilizando balances de materia, para determinar el caudal y la composición de la corriente de

entrada al reactor y, de esta manera, también el de la corriente de entrada a la sección de separación.

3.1.2.1. Síntesis

Este primer bloque corresponde a la unidad de síntesis, a la que se alimenta silicio de grado metalúrgico con una pureza de 98,5 % y cloruro de hidrógeno (1).

Se ha supuesto una conversión para el silicio del 80 %, y se ha tenido en cuenta que en la corriente de salida del reactor:

- Relación molar SiHCl_3 : SiCl_4 = 85 : 15
- HCl no reaccionado: 2–50 % molar
- H_2 , SiCl_4 y SiHCl_3 : 50–98 % molar

También se ha tomado que en la corriente de salida del reactor, el contenido total en otras impurezas es del 1 % molar.

3.1.2.2. Purificación

A esta etapa llegan dos corrientes:

- Corriente de pesados de la unidad de recuperación (8).
- Corriente de salida del reactor de síntesis (2).

Se ha supuesto una corriente de salida formada por triclorosilano puro (3), y que las corrientes que corresponden a los compuestos ligeros (4) y pesados (5) contienen el resto de los componentes no deseados de la corriente de entrada.

También se ha considerado una pérdida del 10 % del triclorosilano de entrada. Esto es, por cada mol de triclorosilano alimentado se obtiene 0,9 mol de triclorosilano puro.

3.1.2.3. Deposición

En esta etapa, en la que se descompone el SiHCl_3 para obtener silicio (6), se han utilizado solamente las reacciones [3.4] y [3.5], asumiendo una conversión de SiHCl_3 del 90 %.

3.1.2.4. Recuperación

La corriente gaseosa que abandona el reactor de deposición (7) llega a esta unidad donde se separa en:

- Una corriente formada por gases no condensables (H_2 y HCl), que se recircula a las entradas de la sección de deposición (9) y de la sección de síntesis (10).
- Una corriente en fase líquida ($SiHCl_3$ y $SiCl_4$), que se recircula a la entrada de la sección de separación (8).

De este bloque no se han encontrado datos, aunque su diseño tampoco es el objetivo de este proyecto.

Se ha considerado que el 10 % de la corriente que llega a esta unidad se purga para evitar la acumulación de impurezas en las demás secciones.

En los cálculos realizados para cumplir los objetivos antes mencionados, se ha obtenido:

- Un rendimiento a triclorosilano del 82 % (ecuación [3.1]), a tetracloruro de silicio del 14 % (ecuación [3.2]) y a diclorosilano del 4 % (ecuación [3.3]) en el reactor de síntesis.
- Una corriente de salida del reactor de síntesis con un contenido en HCl del 27 % molar y en H_2 , $SiHCl_3$ y $SiCl_4$ del 70 % molar.
- Los siguientes caudales para las corrientes del proceso:

Tabla 3.1. Corriente de entrada al reactor de síntesis (1).

Componente	a_i (kmol/día)
HCl	99,39
MG-Si	32

Tabla 3.2. Corriente de entrada a la sección de separación (2)+ (8).

Componente	De síntesis	De recuperación	TOTAL
	a_i (kmol/día)	a_i (kmol/día)	a_i (kmol/día)
H ₂	28,23	0,00	28,23
B ₂ H ₆	0,15	0,00	0,15
PH ₃	0,15	0,00	0,15
HCl	19,86	0,00	19,86
AsH ₃	0,15	0,00	0,15
SiH ₂ Cl ₂	1,05	0,00	1,05
BCl ₃	0,15	0,00	0,15
SiHCl ₃	20,87	1,84	22,71
SiCl ₄	3,68	8,28	11,96
PCl ₃	0,15	0,00	0,15
	74,44	10,12	84,56

Tabla 3.3. Corriente de entrada al reactor deposición (3).

Componente	a_i (kmol/día)
SiHCl ₃	20,44

- Este resultado implica que es necesario purificar aproximadamente 1000 t/año de SiHCl₃.

Tabla 3.4. Corriente de entrada a la unidad recuperación (7).

Componente	a_i (kmol/día)
H ₂	0
B ₂ H ₆	0
PH ₃	0
HCl	18,39
AsH ₃	0
SiH ₂ Cl ₂	0
BCl ₃	0
SiHCl ₃	2,04
SiCl ₄	9,20
PCl ₃	0

- La obtención de aproximadamente 250 kg/día de silicio de grado solar.

3.2. INGENIERÍA DE PROYECTOS

3.2.1. Cálculo preliminar de las unidades de la sección de separación

3.2.1.1. Condensador parcial (E-110)

El diseño de los equipos de intercambio de calor se realiza a partir de los balances de materia y energía. Se calcula la velocidad de transmisión de calor y, utilizando el coeficiente global y la diferencia de temperatura promedio, se determina el área de transferencia requerida.

En los cálculos se han asumido ciertas aproximaciones y valores para algunas variables de diseño, según las recomendaciones de las referencias consultadas [28,35].

La corriente entra al condensador parcial a 300 °C (573,15 K) y 1 MPa, y se trata de conseguir que su temperatura disminuya hasta temperatura ambiente aproximadamente, suponiendo despreciable la caída de presión. Se ha fijado una temperatura de salida de 25 °C (298,15 K).

Se ha elegido el agua como fluido refrigerante, por tratarse del más estándar y porque parece suficiente para lograr el cambio de temperatura deseado. Por lo tanto, su temperatura de entrada debe ser superior a 0 °C, y es recomendable que se utilice a presión atmosférica con el fin de abaratar costes.

En bibliografía se recomienda que el cambio de temperatura experimentado por el fluido refrigerante no sea superior a 10 °C. Esto sirve para fijar sus temperaturas de entrada y salida. Si se establece como criterio que la temperatura de salida de la corriente principal sea 25 °C y la del refrigerante 10 °C menos, esto es, 15 °C (288,15 K); entonces la temperatura de entrada del fluido refrigerante debería ser 5 °C (278,15 K).

Con estos valores se ha realizado una estimación aproximada de las condiciones de salida de la corriente principal, así como del caudal de fluido refrigerante que se necesita para la operación.

Lo primero es conocer qué componentes de la corriente principal condensan y cuáles no, ya que dependiendo de esto va a depender el cálculo del calor que es necesario retirar para enfriar dicha corriente. Para ello, utilizando la ecuación de Antoine extendida (anexo 2) a una presión de 1 MPa, se calcula para cada componente de la corriente su temperatura de saturación. Comparando esa

temperatura con la que se quiere a la salida se puede determinar en qué fase se va a encontrar cada uno de estos compuestos.

Tabla 3.7. Comprobación del cambio de fase de los compuestos puros a 1 MPa.

Componente	T_i^s (K)	Fase
H ₂	31,33	siempre gas
B ₂ H ₆	235,45	siempre gas
PH ₃	243,92	siempre gas
HCl	241,13	siempre gas
AsH ₃	277,50	siempre gas
SiH ₂ Cl ₂	371,04	condensa
BCl ₃	363,48	condensa
SiHCl ₃	391,91	condensa
SiCl ₄	424,22	condensa
PCl ₃	448,61	condensa

El siguiente paso consiste en calcular el caudal de calor necesario para enfriar la corriente desde 573,15 K hasta 298,15 K.

Se ha empezado calculando la fracción de dicho caudal de calor que, en fase gas, corresponde al paso de la corriente desde la temperatura de entrada (573,15 K) a la unidad hasta la temperatura de salida (298,15 K) para los compuestos que no condensan en este intervalo, y hasta su temperatura de saturación para aquellos que sí lo hacen.

$$Q_i^G = n_i \cdot c_{p,i}^G \cdot \Delta T \quad [3.8]$$

$$Q^G = \sum Q_i^G \quad [3.9]$$

Para calcular ese caudal de calor es necesario determinar la capacidad calorífica de cada componente en fase gas. Para ello se ha utilizado la ecuación DIPPR, "Design Institute for Physical Property Data", (anexo 4).

Tabla 3.8. Caudal de calor en fase gas de la corriente a enfriar.

Componente	T_f (K)	T_i (K)	Cp_i^G (J/kmol/K)	n_i (kmol/día)	Q_i^G (W)
H ₂	293,15	573,15	29046,90	28,23	-2609,95
B ₂ H ₆	293,15	573,15	77902,99	0,15	-37,39
PH ₃	293,15	573,15	43424,65	0,15	-20,84
HCl	293,15	573,15	29310,40	19,86	-1852,53
AsH ₃	293,15	573,15	45343,51	0,15	-21,76
SiH ₂ Cl ₂	371,04	573,15	75373,71	1,05	-185,50
BCl ₃	363,48	573,15	70678,67	0,15	-25,86
SiHCl ₃	391,91	573,15	87238,20	22,71	-4155,22
SiCl ₄	424,22	573,15	99944,47	11,96	-2060,19
PCl ₃	448,61	573,15	78385,88	0,15	-17,04

$$Q_G = - 10986 \text{ W}$$

A continuación, se determina la fracción de caudal de calor que corresponde a la condensación de aquellos compuestos que durante el enfriamiento a 1 MPa cambian de fase. Se calcula el calor latente de condensación a la temperatura de saturación de cada compuesto, utilizando la ecuación DIPPR, "Design Institute for Physical Property Data", (anexo 6).

$$Q_i^{cond} = n_i \cdot (-\Delta_{vap}H_i) \quad [3.10]$$

$$Q_{cond} = \sum Q_i^{cond} \quad [3.11]$$

Tabla 3.9. Caudal de calor de la corriente a enfriar correspondiente al calor latente de condensación.

Componente	n_i (kmol/día)	$\Delta_{vap}H_i$ (J/kmol)	Q_i^{cond} (W)
H ₂	-	-	-
B ₂ H ₆	-	-	-
PH ₃	-	-	-
HCl	-	-	-
AsH ₃	-	-	-
SiH ₂ Cl ₂	1,05	18253746	-222,27
BCl ₃	0,15	18157640	-31,69
SiHCl ₃	22,71	20296614	-5333,91
SiCl ₄	11,96	20982227	-2904,11
PCl ₃	0,15	22544031	-39,35

$$Q_{\text{cond}} = - 8531 \text{ W}$$

Por último, se calcula la fracción de calor que corresponde al enfriamiento en fase líquida de aquellos compuestos que han condensado, desde su temperatura de saturación hasta su temperatura de salida (298,15 K).

$$Q_i^L = n_i \cdot c_{p,i}^L \cdot \Delta T \quad [3.12]$$

$$Q_L = \sum Q_i^L \quad [3.13]$$

Para calcular la capacidad calorífica en fase líquida se ha utilizado la correlación de Rowlinson–Bondi (anexo 5).

Tabla 3.10. Flujo de calor en fase líquida de la corriente a enfriar.

Componente	T_f (K)	T_i (K)	$C_{p_i}^L$ (J/kmol/K)	n_i (kmol/día)	Q_i^L (W)
H ₂	-	-	-	-	-
B ₂ H ₆	-	-	-	-	-
PH ₃	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	-	-
AsH ₃	-	-	-	-	-
SiH ₂ Cl ₂	371,04	293,15	96252	1,05	-85,42
BCl ₃	363,48	293,15	100144	0,15	-11,42
SiHCl ₃	391,91	293,15	119434	22,71	-2942,69
SiCl ₄	424,22	293,15	138010	11,96	-2408,12
PCl ₃	448,61	293,15	119450	0,15	-31,37

$$Q_L = - 5479 \text{ W}$$

El calor total que es necesario retirar para enfriar la corriente se calcula como:

$$Q_{\text{TOTAL}} = Q_G + Q_{\text{cond}} + Q_L \quad [3.14]$$

$$Q_{\text{TOTAL}} = - 24997 \text{ W}$$

Este caudal de calor es el que debe retirar el fluido refrigerante utilizado, en este caso el agua. Conocido dicho caudal de calor, su capacidad calorífica y la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida, se puede calcular el caudal de agua necesario.

$$Q_{TOTAL} = m \cdot c_{p,refrig} \cdot \Delta T_{refrig} \quad [3.15]$$

$$\left. \begin{array}{l} T_{\text{refrigerante entrada}} = 278,15 \text{ K} \\ T_{\text{refrigerante salida}} = 288,15 \text{ K} \\ T_{\text{corriente entrada}} = 573,15 \text{ K} \\ T_{\text{corriente salida}} = 298,15 \text{ K} \end{array} \right\} (m_{\text{refrigerante}})_{\text{min}} = 0,598 \text{ kg/s}$$

El área de intercambio necesaria para eliminar esa cantidad de calor se calcula en el anexo 8, obteniendo un resultado de:

$$A = 8 \text{ m}^2$$

3.2.1.2. Separador gas/líquido (D-210)

En esta unidad se produce la separación en una sola etapa del efluente del reactor de síntesis, que previamente ha pasado por el condensador parcial, para obtener una corriente en fase líquida y una corriente en fase vapor en equilibrio. Esta separación se lleva a cabo con el objetivo de separar los compuestos no condensables y/o más ligeros de la corriente de entrada, en este caso H_2 , B_2H_6 , PH_3 , HCl ..., como paso previo a la destilación multicomponente.

En estos cálculos se utiliza la constante de reparto o coeficiente de distribución K_i , que para cada componente es la relación de fracciones molares de las fases vapor y líquida en equilibrio.

$$K_i = \frac{y_{ie}}{x_{ie}} \quad [3.16]$$

Para los componentes principales de estas mezclas (SiCl_4 , SiHCl_3 y SiH_2Cl_2) no se dispone de la información suficiente para poder aplicar modelos termodinámicos de equilibrio líquido-vapor tales como Wilson, NRTL, UNIQUAC, UNIFAC... Entonces, desde el punto de vista del equilibrio líquido-vapor, estas mezclas se van a tratar como si tuvieran un comportamiento ideal, dado que las variaciones de composición entre las corrientes es mínima. De esta manera, si se aplican las leyes de Raoult y

Dalton los valores de K_i se pueden calcular a partir de la presión de vapor y la presión total del sistema:

$$K_i = \frac{P_i^s}{P} \quad [3.17]$$

La presión de vapor se calcula a la temperatura a la que la corriente principal abandona el condensador parcial (25 °C <> 298,15 K). Se utiliza la ecuación de Antoine extendida, cuya ecuación y parámetros de describen en el anexo 2.

La presión total del sistema, que es la presión de la corriente a la salida condensador parcial, se ha ido modificando hasta obtener la separación líquido-vapor más apropiada. En este caso, ha resultado ser 1MPa.

Tabla 3.5. Presión de vapor y constantes de reparto en la corriente de entrada al separador gas/líquido.

Componente	T_{\min} (K)	T_{\max} (K)	P_i^s (MPa)	K_i (-)
H ₂	13,95	33,19	fuera intervalo	-
B ₂ H ₆	107,65	289,80	fuera intervalo	-
PH ₃	139,37	324,75	3,85	3,85
HCl	158,97	324,65	4,72	4,72
AsH ₃	156,23	373,00	1,64	1,64
SiH ₂ Cl ₂	151,15	459,00	0,16	0,16
BCl ₃	166,15	451,95	0,18	0,18
SiHCl ₃	144,95	479,00	0,08	0,08
SiCl ₄	204,30	507,00	0,03	0,03
PCl ₃	181,15	563,15	0,02	0,02

La ecuación de Antoine está restringida a unos intervalos de temperatura de aplicación. Como puede verse, a 298,15 K H₂ y B₂H₆ están fuera de su intervalo. Por lo tanto, no se puede calcular ni su presión de vapor ni tampoco su constante de reparto porque no van a cambiar de fase. Atendiendo a los intervalos de temperatura de estos compuestos, se observa que bajo estas condiciones se presentan en fase gas.

Para asegurar que los demás compuestos se encuentran en las condiciones de equilibrio para separarse en dos fases se ha de cumplir:

$$\sum K_i \cdot z_{Ai} = 1,15 > 1 \quad [3.18]$$

$$\sum \frac{z_{Ai}}{K_i} = 8,13 > 1 \quad [3.19]$$

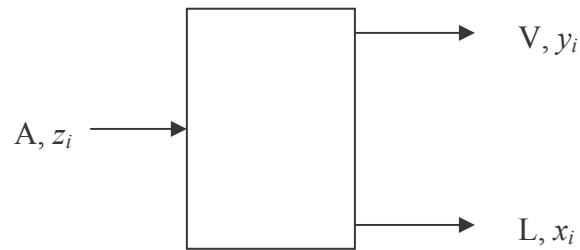


Figura 3.4. Esquema de las corrientes implicadas en el separador gas/líquido.

A partir del balance de materia y la relación de equilibrio:

$$F \cdot z_i = V \cdot y_i + L \cdot x_i \quad [3.20]$$

$$y_i = K_i \cdot x_i \quad [3.21]$$

Se calculan L y V haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$L = \sum \frac{F \cdot z_i}{\left[\frac{K_i}{L/V} + 1 \right]} \quad [3.22]$$

$$V = \sum \frac{F \cdot z_i}{\left[\frac{L/V}{K_i} + 1 \right]} \quad [3.23]$$

Lo primero que hay que hacer es suponer un valor arbitrario para la relación L/V . Con ese valor se calcula V utilizando la ecuación [4.8]. A partir de dicho valor y F se calcula L . Con los nuevos valores de L y V se recalcula L/V , que se compara con el valor supuesto. Si son diferentes se toma el valor calculado como supuesto y se vuelve a realizar el cálculo anterior. Así sucesivamente hasta que los valores supuesto y calculado coincidan. En este caso, se ha obtenido:

$$\frac{L}{V} = 0,74 \quad [3.24]$$

Con el valor anterior se calculan los valores finales de caudal y composición para las corrientes en fase líquida y en fase vapor que salen de esta unidad,

obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 3.6. El caudal total de líquido obtenido a 298,15 K y 1 MPa es de 35,36 kmol/día y el de vapor de 49,20 kmol/día.

El cálculo del diámetro y altura del separador se detalla en el anexo 9, obteniendo los siguientes resultados:

$$H = 39 \text{ cm}$$

$$D = 13 \text{ cm}$$

Tabla 3.6. Caudal y composición de las corrientes A , L y V del separador gas/líquido.

Componente	a_i (kmol/día)	$x_{A,i}$ (frac. molar)	v_i (kmol/día)	$x_{V,i}$ (frac. molar)	l_i (kmol/día)	$x_{L,i}$ (frac. molar)
H ₂	28,23	0,3339	28,23	0,5738	0,00	0,0000
B ₂ H ₆	0,15	0,0018	0,15	0,0031	0,00	0,0000
PH ₃	0,15	0,0018	0,13	0,0026	0,02	0,0006
HCl	19,86	0,2348	17,36	0,3529	2,49	0,0705
AsH ₃ (CL)	0,15	0,0018	0,11	0,0022	0,04	0,0012
SiH ₂ Cl ₂ (CP)	1,05	0,0124	0,20	0,0041	0,85	0,0241
BCl ₃	0,15	0,0018	0,03	0,0007	0,12	0,0033
SiHCl ₃	22,71	0,2685	2,43	0,0494	20,27	0,5734
SiCl ₄	11,96	0,1414	0,55	0,0112	11,41	0,3226
PCl ₃	0,15	0,0018	0,00	0,0001	0,15	0,0042

3.2.1.3. Columnas de destilación (D-310 y D-320)

La purificación del triclorosilano se va a llevar a cabo por destilación, de forma continua y con reflujo. Es decir, una parte del condensado obtenido por ebullición de la mezcla líquida a separar, retorna de nuevo a la columna, en condiciones tales que el líquido que retorna se pone en contacto íntimo con los vapores que ascienden hacia el condensador.

En mezclas multicomponente, uno de los componentes puede ser más volátil que el promedio en una parte de la columna y menos volátil que el promedio en cualquier otra parte, lo que conduce a perfiles de concentración complejos.

En la práctica se utilizan programas de ordenador, debido al gran número de cálculos que es preciso realizar para cuantificar las variables de diseño y operación, así como para las numerosas iteraciones que se requiere para conseguir la convergencia de las soluciones a las ecuaciones.

En el diseño de una columna de destilación se recomiendan los siguientes pasos:

1. Especificar el grado de separación requerido.
2. Seleccionar las condiciones de operación (presión de operación).
3. Seleccionar el tipo de contacto: platos o relleno.
4. Determinar el número de etapas y la relación de reflujo.
5. Determinar el tamaño de la columna: diámetro y número de etapas reales.
6. Diseñar el interior de la columna: platos, distribuidores, soportes de relleno...
7. Diseño mecánico de recipiente y accesorios internos ("fittings").

▪ *Columna D-310*

La corriente de alimentación a esta columna es la corriente en fase líquida que abandona el separador gas/líquido.

El objetivo de la destilación es la separación de la alimentación en corrientes de productos casi puros. En la destilación multicomponente se eligen dos componentes, denominados **componentes clave**, cuyas concentraciones en destilado y residuo constituyen un buen índice de la separación conseguida. En esta unidad, en la que se trata de aislar el SiHCl_3 , esos componentes van a ser el SiHCl_3 y el SiCl_4 . A su vez, estos componentes, de diferente volatilidad, se identifican como *clave ligero* (CL) el **SiHCl_3** y como *clave pesado* (CP) el **SiCl_4** .

Cuando los componentes clave ligero y clave pesado no tienen temperaturas de ebullición contiguas, existen otros con temperaturas de ebullición intermedias denominados *componentes interclave*. En este caso, no hay ningún componente con temperatura de ebullición intermedia entre el triclorosilano y el tetracloruro de silicio.

Una vez elegidos los componentes clave se asignan, arbitrariamente, valores bajos para las composiciones del clave pesado en el destilado ($x_{\text{CP,D}}$) y del clave ligero en el residuo ($x_{\text{CL,R}}$). La elección de pequeños valores para $x_{\text{CP,D}}$ y $x_{\text{CL,R}}$ supone que la mayor parte del clave ligero sale en el destilado, mientras que la mayor parte del clave pesado lo hace con el residuo. Para los cálculos de esta columna se ha tomado:

$$x_{\text{CP,D}} = 0,0001$$

$$x_{\text{CL,R}} = 0,0001$$

Con estos valores se puede considerar que en el residuo prácticamente no hay nada de clave ligero, ni en el destilado nada de clave pesado.

Así, se pueden calcular las composiciones y caudales en destilado y residuo de los demás componentes:

Tabla 3.11. Composiciones y caudales en las corrientes de alimentación, destilado y residuo.

Componente	a_i (kmol/día)	$x_{A,I}$ (frac. molar)	d_i (kmol/día)	$x_{D,I}$ (frac. molar)	r_i (kmol/día)	$x_{R,I}$ (frac. molar)
H ₂	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
B ₂ H ₆	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
PH ₃	0,02	0,0006	0,02	0,0010	0,00	0,0000
HCl	2,49	0,0705	2,49	0,1048	0,00	0,0000
AsH ₃	0,04	0,0012	0,04	0,0019	0,00	0,0000
SiH ₂ Cl ₂	0,85	0,0241	0,85	0,0358	0,00	0,0000
BCl ₃	0,12	0,0033	0,12	0,0050	0,00	0,0000
SiHCl ₃ (CL)	20,27	0,5734	20,27	0,8517	0,00	0,0000
SiCl ₄ (CP)	11,41	0,3226	0,00	0,0000	11,41	0,9873
PCl ₃	0,15	0,0042	0,00	0,0000	0,15	0,0127

El destilado se compone de:

- Todos los componentes más ligeros que el clave ligero.
- Cantidades específicas de clave ligero (~ todo) y clave pesado (~ nada).
- Nada de los compuestos más pesados que el clave pesado.

$$D = \sum d_i = 23,08 \text{ kmol / día}$$

El residuo, por su parte, se compone de:

- Todos los componentes más pesados que el clave pesado.
- Cantidades específicas de clave ligero (~ nada) y clave pesado (~ todo).
- Nada de los compuestos más ligeros que el clave ligero.

$$R = \sum r_i = 11,56 \text{ kmol / día}$$

Conocidos estos datos, el siguiente paso consiste en la estimación de la presión de operación. Teniendo en cuenta que ésta varía a lo largo de la columna, habrá que estimar la presión en la caldera o presión de fondo y la presión en el condensador o presión de cabeza. Para ello, se ha seguido un algoritmo consultado en bibliografía [36].

La estimación de la presión de cabeza se inicia calculando la presión de burbuja del destilado a 49°C.

$$P_D(49^\circ\text{C}) = 1,01 \text{ MPa}$$

Como la presión de burbuja calculada a 49°C es menor de 1,48 MPa, se puede considerar que esa presión en cabeza de columna es adecuada, que se debe utilizar un condensador total y que el fluido refrigerante puede ser agua.

$$P_D = 1,01 \text{ MPa}$$

A continuación, se calcula la presión en el fondo de la columna. Para ello hay que sumar a la presión en cabeza, la pérdida de presión que se produce en el condensador, que toma valores entre 0 y 0,014 MPa, y la pérdida de presión a lo largo de la columna. Ésta se calcula teniendo en cuenta que la caída de presión en cada piso de la misma es aproximadamente de 0,0007 MPa o bien, de forma global para toda la columna, de 0,035 MPa. Como no se conoce aún el número de pisos de la columna, se ha tomado un valor de 0,035 MPa, obteniendo una presión de fondo de:

$$P_R = 1,06 \text{ MPa}$$

Conocida la presión en la caldera, se calcula la temperatura de burbuja de la mezcla a esa presión, con el objetivo de comprobar si es menor que la temperatura crítica media de la mezcla. Si fuera mayor, a esa temperatura y presión los compuestos se decompondrían. En ese caso habría que corregir la presión de fondo, disminuyendo su valor hasta que la temperatura de burbuja de la mezcla a esa presión fuera menor que su temperatura crítica media.

En este caso para una $P_R = 1,06 \text{ MPa}$ se obtiene una $T_R = 427,44 \text{ K}$. Por otro lado, la temperatura crítica media de la mezcla es $T_{C,media} = 476,83 \text{ K}$.

$$T_R = 415,79 \text{ K} < T_{C,media} = 476,83 \text{ K}$$

Es decir, la presión calculada en la caldera es adecuada, no siendo necesario hacer ninguna corrección de la misma.

Toda columna de destilación se divide en dos zonas separadas por la alimentación (A) a la misma: la zona superior de la columna, que se denomina sector

de enriquecimiento y consta de N pisos, y la zona inferior de la columna, que se denomina sector de agotamiento y consta de M pisos. La corriente de alimentación (A) se introduce en la columna por el piso M. Además, en toda columna hay que incluir un piso más correspondiente a la caldera y otro correspondiente al condensador, sólo en el caso de que éste fuera parcial.

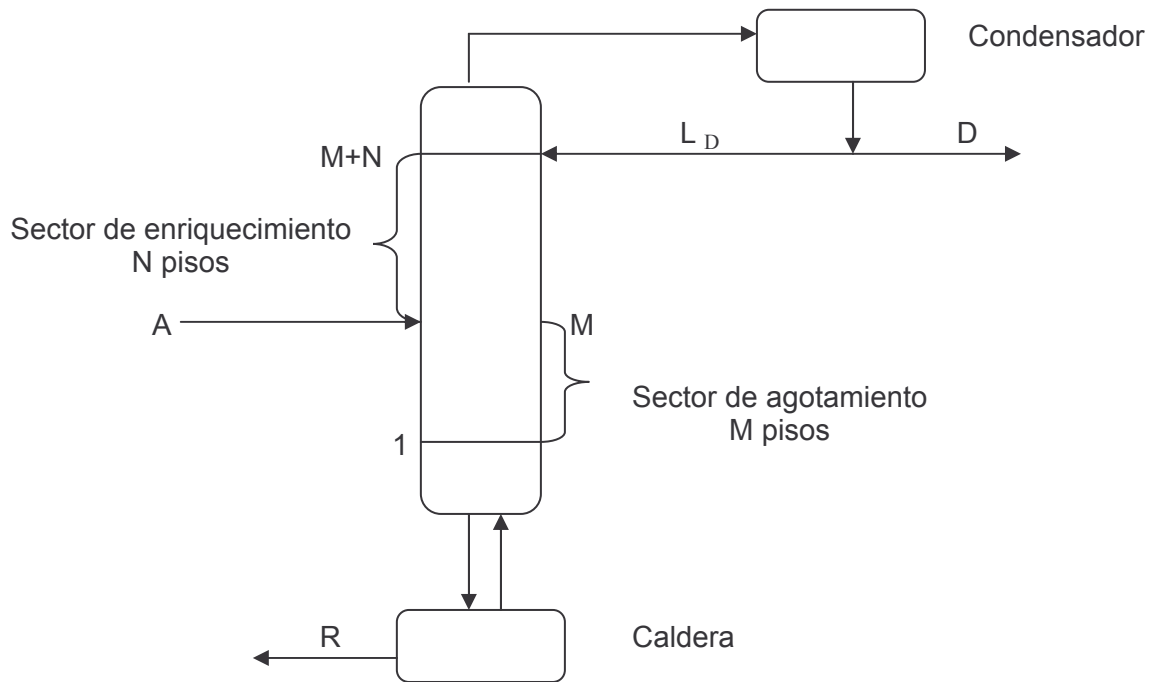


Figura 3.5. Representación esquemática de una columna de destilación general.

El siguiente paso consiste en calcular el número mínimo de pisos de la columna utilizando la ecuación de Fenske (1932):

$$(M + N + 1)_{min} = \frac{\log \left[\frac{x_{CL,D} \cdot x_{CP,R}}{x_{CL,R} \cdot x_{CP,D}} \right]}{\log(\alpha_{CL,CP})_{media}} \quad [3.25]$$

donde $\alpha_{CL,CP}$, volatilidad relativa media del clave ligero respecto del clave pesado, se calcula como:

$$(\alpha_{CL,CP})_{media} = \sqrt{(\alpha_{CL,CP})_D \cdot (\alpha_{CL,CP})_R} \quad [3.26]$$

El resultado obtenido es:

$$(M + N + I)_{\min} = 76 \rightarrow \text{Numero mínimo de pisos total incluyendo la caldera}$$

A continuación, se calcula la relación de reflujo mínima. La relación de reflujo (L/D) da idea de cómo se dividen las corrientes de salida del condensador (L y D). Esta relación es mínima cuando la cantidad de líquido que se devuelve a la columna va siendo cada vez menor, hasta el punto en que ya no es capaz de arrastrar los compuestos pesados. Incluso con una columna de infinitos pisos no se llegaría a la separación. La relación de reflujo mínima se alcanzaría en el instante inmediatamente anterior.

Para mezclas multicomponente la relación de reflujo mínima se calcula utilizando el método de Underwood (1948), basado en dos ecuaciones:

$$\sum_{i=1}^c \frac{\alpha_i \cdot a_i}{\alpha_i - \theta} = 1 - q \quad [3.27]$$

$$\sum_{i=1}^c \frac{\alpha_i \cdot x_{i,D}}{\alpha_i - \theta} = \left(\frac{L}{D}\right)_{\min} + 1 \quad [3.28]$$

donde:

a_i : composición del alimento

q : naturaleza térmica del alimento

$x_{i,D}$: composición del destilado

α_i : volatilidades relativas de todos los componentes respecto del calve pesado en la caldera

Θ : parámetro matemático sin significado físico

Primero se calcula Θ con la ecuación [3.28], y sustituyendo su valor en la ecuación [3.27] se calcula la relación de reflujo mínima. Para calcular Θ se requiere conocer el valor de q (naturaleza térmica del alimento), que se calcula como:

$$q = \frac{\text{calor necesario para vaporizar 1 mol de alimento}}{\text{calor latente de vaporización}} \quad [3.29]$$

El numerador de la ecuación anterior es la suma de dos términos: el calor latente de vaporización, y el calor que hay que aportar para que la mezcla de

alimentación pase de su temperatura de entrada a la columna a su temperatura de ebullición a la presión de operación.

El calor latente de vaporización se calcula utilizando la ecuación DIPPR (anexo 6). Para calcular el calor necesario para vaporizar la alimentación se requiere, además, la capacidad calorífica en fase líquida. Ésta se calcula con la correlación de Rowlinson-Bondi (anexo 5).

De esta forma, se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}q &= 1,204 \\ \Theta &= 1,19 \\ (L/D)_{\min} &= 1,226\end{aligned}$$

Lo siguiente es el cálculo de la relación de reflujo óptima, que normalmente suele tomar valores entre 1,2 y 1,5 veces la relación de reflujo mínima [28]. Se toma como valor óptimo $1,2 \cdot (L/D)_{\min}$ debido a que, de esta manera en el peor de los casos, se sobredimensiona la columna.

$$(L/D)_{\text{óptima}} = 1,471$$

A continuación, para esta relación de reflujo óptima se calcula el número total de pisos de equilibrio ideales o teóricos utilizando la ecuación de Molokanov, que ajusta la curva experimental de Gilliland (1940):

$$x = \frac{\left(\frac{L}{D}\right) - \left(\frac{L}{D}\right)_{\min}}{\left(\frac{L}{D}\right) + 1} \quad [3.30]$$

$$y = \frac{(M + N + 1) - (M + N + 1)_{\min}}{(M + N + 1) + 1} \quad [3.31]$$

$$y = 1 - \exp \left[\left(\frac{1 + 54,4 \cdot x}{11 + 117,2 \cdot x} \right) \cdot \left(\frac{x - 1}{x^{0,5}} \right) \right] \quad [3.32]$$

El resultado obtenido es:

$$(M+N+I)_{\text{ideal}} = 172 \rightarrow \text{Número total de pisos de equilibrio incluyendo la caldera}$$

El equilibrio líquido–vapor rara vez se alcanza en una etapa de separación real. Por ello se introduce el concepto de eficacia de la etapa de separación, que relaciona la etapa real con la etapa teórica de equilibrio. Se puede realizar una estimación rápida de la eficacia global de la columna mediante la correlación de O’Connell (1946) [28], en la que la eficacia total de la columna se relaciona con el producto de la volatilidad relativa del componente clave ligero y la viscosidad molar media de la alimentación, estimada a partir de la temperatura media de la columna. Eduljee (1958) expresó la correlación gráfica que O’Connell obtuvo a partir de datos experimentales bajo la forma de la ecuación:

$$E_o = 51 - 32,5 \cdot \log(\mu_a \cdot \alpha_a) \quad [3.33]$$

donde:

μ_a : viscosidad molar media del líquido (N·s/m²)

α_a : volatilidad relativa media del clave ligero

Para el cálculo de la viscosidad del líquido se utiliza la ecuación DIPPR, “Design Institute for Physical Property Data”, (anexo 7).

Se ha obtenido un resultado de:

$$E_o = 100 \%$$

Este resultado indica un comportamiento prácticamente ideal, tanto de la mezcla como de las etapas de separación. Debido al elevado número de etapas que se obtiene para conseguir la separación, la diferencia de concentraciones entre cada dos consecutivas es prácticamente despreciable, lo que da como resultado una separación de equilibrio ideal (eficacia $\approx 100\%$).

Por lo tanto, el número total de pisos reales de la columna es:

$$(M+N+I)_{\text{real}} = 172 \rightarrow \text{Número total de pisos reales incluyendo la caldera}$$

Para localizar cuál es el piso óptimo por el que debe entrar la corriente de alimentación a la columna, hay que calcular el número de pisos de la sección de enriquecimiento (M) y de la sección de agotamiento (N) por separado. Tal y como se

indica en la figura 3.5, el piso de la alimentación es el identificado como piso M . Para ello se utilizan dos ecuaciones:

$$N + M = 171 \quad [3.34]$$

La ecuación empírica de Kirkbride (1944):

$$\frac{N}{M+1} = \left[\left(\frac{a_{CP}}{a_{CL}} \right) \cdot \left(\frac{x_{CL,R}}{x_{CP,D}} \right)^2 \cdot \left(\frac{R}{D} \right) \right]^{0,206} \quad [3.35]$$

Resolviendo el sistema se obtiene:

$$N = 97 \text{ pisos} \quad M = 74 \text{ pisos}$$

piso en el que se introduce la alimentación → piso nº 74

Los resultados anteriores se recogen en la tabla 3.12.

Tabla 3.12. Resultados del cálculo preliminar en D-310.

F (kmol/día)	35,36
D (kmol/día)	23,80
R (kmol/día)	11,56
P_D (MPa)	1,01
P_R (MPa)	1,06
Tipo de condensador	Total
$(M+N+I)_{\min}$	76
$(L/D)_{\min}$	1,226
$(L/D)_{\text{óptima}}$	1,471
$(M+N+I)_{\text{ideal}}$	172
E_o (%)	100
$(M+N+I)_{\text{real}}$	172
Piso de alimentación	74

Por último, a partir de los parámetros calculados anteriormente podemos determinar el diámetro de la columna realizando una estimación de las dos secciones de la columna, la de enriquecimiento y la de agotamiento. El diámetro resultante corresponde a 0,50m. (Anexo 9.3)

- *Columna D-320*

La corriente de alimentación a esta segunda columna es la corriente de destilado que abandona la columna anterior.

Se trata de conseguir que su corriente de destilado tenga una pureza de, al menos, el 99,99 % en SiHCl_3 , objetivo final de la sección de separación.

En esta columna, los componentes clave van a ser el SiHCl_3 y SiH_2Cl_2 , debiendo aislar una corriente purificada del primero de ellos. Concretamente, el **SiH_2Cl_2** será el *clave ligero* y el **SiHCl_3** el *clave pesado*.

Los valores asignados a $x_{\text{CP,D}}$ y $x_{\text{CL,R}}$ coinciden con los del apartado anterior.

En esta ocasión, los componentes clave ligero y clave pesado no tienen temperaturas de ebullición contiguas. Existen un componente, el BCl_3 , con una temperatura de ebullición intermedia entre el triclorosilano y el diclorosilano, que se denomina *componente interclave*.

El procedimiento de cálculo es el mismo que el utilizado para la columna anterior. Los resultados obtenidos son:

Tabla 3.13. Resultados del cálculo preliminar en D-320.

F (kmol/día)	23,80
D (kmol/día)	3,53
R (kmol/día)	20,27
P_D (MPa)	1,07
P_R (MPa)	1,12
Tipo de condensador	Parcial
$(M+N+2)_{\text{min}}$	112
$(L/D)_{\text{min}}$	6,837
$(L/D)_{\text{optima}}$	8,204
$(M+N+2)_{\text{ideal}}$	226
E_o (%)	100
$(M+N+2)_{\text{real}}$	220
Piso de alimentación	161
Diámetro(m)	0,40

3.2.2. Diseño mecánico

En este apartado se va a proceder a realizar el diseño mecánico de uno de los equipos de la sección de separación, la primera columna de destilación (D-310).

3.2.2.1. Elección del tipo de columna

Las columnas de separación por destilación pueden ser de dos tipos: de platos o de relleno. El empleo de columnas de relleno frente a las de platos se ve favorecido en los siguientes casos:

- Cuando las columnas son de pequeñas dimensiones (menos de 0,6 m de diámetro)
- Si se tienen sustancias corrosivas o se forma mucha espuma.
- Si se requiere que la pérdida de carga en la columna sea pequeña.
- Si la velocidad del líquido es elevada.

En este caso, se eligen columnas de relleno debido principalmente al pequeño diámetro calculado para nuestras columnas.

3.2.2.2. Elección del relleno

Los principales requisitos que debe cumplir el relleno de una columna son:

- Proporcionar un gran área superficial: elevada área interfacial entre el vapor y el líquido.
- Tener una estructura abierta: baja resistencia a la circulación del vapor.
- Facilitar la distribución uniforme del líquido sobre su superficie.
- Facilitar el paso uniforme del vapor a través de toda la sección de la columna.

Se tienen dos tipos de relleno:

- *Al azar*: es bastante económico. Los rellenos de este tipo más utilizados hasta hace no mucho eran los anillos Raschig y las sillas o monturas Berl, que ahora han sido reemplazados por otros más eficaces como los anillos Pall, las monturas Intalox o los anillos Bialecki.
- *Estructurado*: es bastante más caro por unidad de volumen que el relleno al azar, pero ofrece mucha menos pérdida de carga por etapa y tiene mayor eficacia y capacidad.

En este caso se elige un relleno al azar, más habitual y del que se aporta mayor cantidad de información en bibliografía. Dentro de los rellenos al azar se seleccionan los anillos Pall, debido a su gran capacidad y a que proporcionan menor caída de presión que otros rellenos.

El relleno se fabrica en un material resistente a la corrosión (metal, cerámica o plástico), que debe ser seleccionado atendiendo a la naturaleza del fluido y a la temperatura de operación. Como ya se ha dicho con anterioridad los compuestos que se manejan son corrosivos, por lo que es necesario utilizar materiales resistentes tales como los aceros inoxidable. El acero inoxidable que cumple los requisitos necesarios y, al mismo tiempo, es el más económico es el acero AISI 316, seleccionado como material de fabricación del relleno utilizado.

El tamaño del relleno no debe superar los 50 mm. Cuanto más pequeño sea dicho tamaño más eficaz es el relleno, pero también más elevado es su precio. En este caso, debido al pequeño diámetro de la columna conviene elegir un tamaño pequeño, aunque también su coste sea algo mayor. Así se logra una mayor área superficial y un mayor factor de relleno. Para anillos Pall metálicos el tamaño elegido es de 25 mm \llcorner 1", lo que supone un área superficial de 210 m²/m³ y un factor de relleno de 48.

3.2.2.3. Altura de relleno

Para calcular la altura de una columna de relleno, el tratamiento más simple es considerar que se trata de una columna de pisos y utilizar el concepto de altura equivalente de un plato teórico (HETP). La HETP es la altura de relleno que produce la misma separación que una etapa de equilibrio. Este valor es esencialmente constante para un tipo y tamaño de relleno, e independiente de las propiedades físicas del sistema. Para conocer la altura necesaria de la columna bastará con determinar el número de pisos necesarios y su HETP.

Para poder tomar un dato de HEPT hay que acudir a gráficos en los que se estima este parámetro en función del tipo de relleno, su tamaño y de un factor conocido como factor superficial (F), que se calcula como:

$$F = V \sqrt{\rho_v} \quad [3.36]$$

Para anillos Pall de 25 mm \llcorner 1" se utiliza el gráfico 3.7.

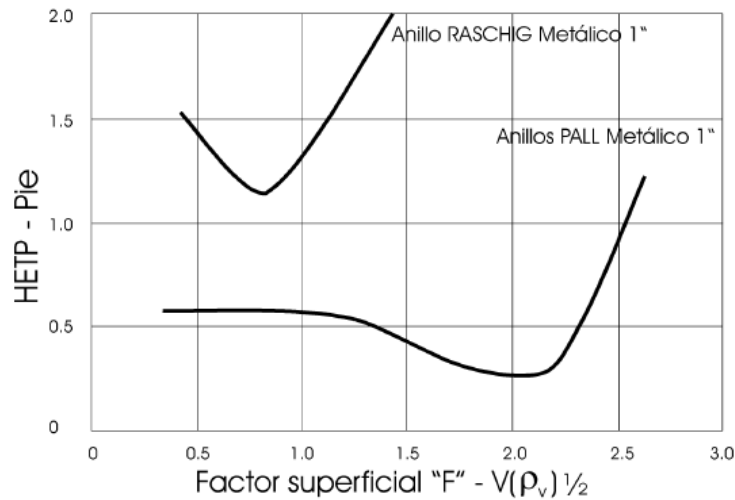


Figura 3.7. Gráfico para el cálculo de la HEPT con anillos metálicos Raschig y Pall de 1" de diámetro.

Para un factor superficial medio de 0,5 la HEPT es aproximadamente 0,6 pies \Leftrightarrow 0,18 m, con lo que resulta una altura total de lecho de aproximadamente \approx 31 m.

3.2.2.4. Distribuidor de líquido

Se deben colocar dos distribuidores principales de líquido, uno en cabeza de columna, cuando se devuelve a la columna parte del destilado, y otro a la altura de la columna en la que se introduzca la alimentación. Estos distribuidores son necesarios ya que el relleno, por si solo, no permite una adecuada distribución del líquido. Dado el diámetro de esta columna, se ha elegido un distribuidor tipo vertedero–canal (VRG) de la casa comercial *Sulzer Chemtech*, construido en acero AISI 316 (figura 3.8).

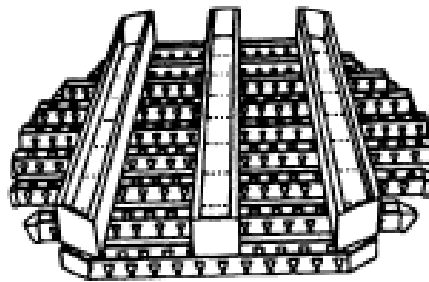


Figura 3.8. Distribuidor tipo vertedero-canal (VRG).

Cada 4 ó 5 m es necesario recoger el líquido que baja por las paredes de la columna y redistribuirlo. Para ello se utilizan redistribuidores tipo Rosette en acero AISI 316, como el que se muestra en la figura 3.9, que van soldados a la pared de la columna.

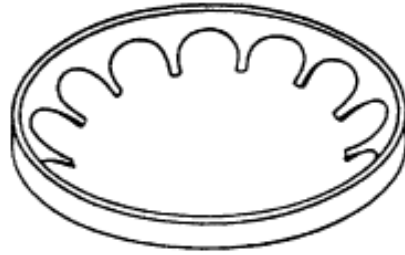


Figura 3.9. Redistribuidor tipo Rosette.

3.2.2.5. Rejilla para soporte y sujeción del relleno

Se utilizan una en la parte superior para evitar el desplazamiento, expansión y/o dispersión del lecho, y otra en la parte inferior para soportar el peso del relleno. Ambas son de acero AISI 316. Atendiendo al diámetro de la columna y al tipo de relleno se ha elegido una placa tipo TE de la casa comercial *Sulzer Chemtech*, como la que se muestra en la figura 3.10.

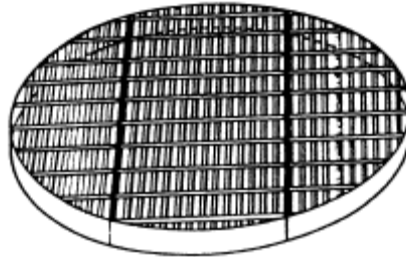


Figura 3.10. Rejilla soporte tipo TE.

3.2.2.6. Diseño del recipiente

Como en todos los recipientes a presión el diseño y fabricación de esta columna se realiza siguiendo unas normas y códigos estándar. En el Reino Unido se sigue la norma *BS 5500* de la *British Standard*; y en Estados Unidos la *sección VIII (Boiler and Pressure Vessel Code)* del código *ASME (American Society of Mechanical Engineers)*.

- **Presión de diseño**

La columna se debe diseñar de modo que soporte la máxima presión a la que es probable que se someta durante la operación, es decir, la presión en la caldera. Para recipientes sometidos a presión interna se toma como presión de diseño un valor un 10 % por encima de la presión de trabajo.

$$P_{\text{diseño}} = 1,3 \text{ MPa}$$

▪ *Temperatura de diseño*

Esta variable es importante para la estimación de ciertos parámetros de diseño de la columna en los que se utilizan propiedades del material. Tales propiedades deben ser las que correspondan a la temperatura de diseño, es decir, la máxima temperatura de trabajo posible. En este caso se puede considerar como temperatura máxima la temperatura crítica media de la mezcla, por encima de la cual los componentes se descomponen:

$$T_{\text{diseño}} = 476,8 \text{ K}$$

▪ *Elección del material*

El tema de los materiales para recipientes de presión está cubierto en las normas BS 1501 para platos, BS 1502 para secciones y barras, BS 1503 para forjas y BS 1504 para carcasas.

La columna opera bajo condiciones de alta temperatura, alta presión y condiciones de corrosión, debido a los compuestos que por ella circulan. Por lo que como material más adecuado para la construcción de esta columna se ha elegido el siguiente acero:

Acero nº 316 (AISI) o S31600 (UNS)

Las principales características de este material se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3.20. **Características del material seleccionado: acero AISI 316.**

Característica	Acero tipo 316 (AISI)
Nombre según la UNS (<i>Unified Alloy Numbering System</i>)	S31600
Susceptibilidad para ser trabajado	Satisfactoria
Trabajo en frío	Satisfactorio
Trabajo en caliente	Satisfactorio
Fundición	Difícil
Soldadura	Satisfactoria
Temperatura de templado (°C)	1050
Coste (£/ton)	1140
% Cr	16-18
% Ni	10-14
% Mo	2,0-3,0
% C	0,08
% Si	1,0
% Mn	2,0
Resistencia a la tensión (MPa)	565
Elongación (%)	55
Dureza Brinell (HB)	149
Coefficiente de expansión térmica [10^{-6} mm/(mm·°C)]	16,0
Intervalo de temperatura (°C)	0-100
Temperatura de fusión (°C)	-
Conductividad térmica (W/(m·°C))	
a 100 °C	16,27
a 500 °C	21,46

Las soldaduras se realizan utilizando electrodos de aceros inoxidables, y haciendo uso de un procedimiento homologado de soldadura. Concretamente se utilizan los siguientes aceros, que se caracterizan por tener pequeñas cantidades de Ti y Ta:

Aceros nº 347 (AISI) o S34700 (UNS) y nº 321 (AISI) o S32100 (UNS).

En relación con las soldaduras es muy importante el factor de soldadura, J , medida de la relación entre la resistencia de la pieza soldada y la resistencia de la pieza del material original. Normalmente J tiene valores altos comprendidos entre 0,9 y 1. En este caso, y dada la forma de realizar la soldadura, no se cometería demasiado error si se toma:

$$J \sim 1$$

▪ **Tensión nominal de diseño**

Para realizar el diseño es necesario decidir el valor de la máxima tensión que se acepta en el material de construcción. Esta tensión nominal se determina aplicando un factor de corrección sobre la resistencia nominal, que es la tensión máxima que el material podría soportar sin fallo en un ensayo estándar.

En bibliografía [28] se indica un factor de corrección en los aceros inoxidables de 1,5. Al aplicarlo a la resistencia a la tensión del acero nº 316 (565 MPa) resulta:

$$S = 847,5 \text{ MPa}$$

▪ **Corrosión admitida**

Es el espesor adicional de material, añadido para permitir la pérdida del mismo por corrosión, erosión y/o ensuciamiento. En bibliografía [28] se ha encontrado que para recipientes a presión que operan bajo condiciones severas, se recomienda un valor de:

$$C = 4 \text{ mm}$$

▪ **Espesor del recipiente**

El espesor de la pared cilíndrica de la columna, se calcula a partir de la siguiente expresión recogida en el código ASME:

$$t = \frac{P_{\text{diseño}} R_{\text{interior}}}{S J - 0,6P} + C \quad [3.37]$$

donde:

t : espesor de la pared (in)

$P_{\text{diseño}}$: presión de diseño (psi)

R : radio interior (in)

S : tensión nominal de diseño (psi)

J : factor de soldadura (adimensional)

C : corrosión permitida (in)

A partir de los valores calculados o estimados para cada una de las variables anteriores, se ha obtenido el siguiente valor para el espesor de la pared cilíndrica de la columna:

$$t = 0,7 \text{ in } \leftrightarrow 18 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el diámetro externo es:

$$D_{\text{externo}} \approx 0,52 \text{ m}$$

Para recipientes cilíndricos que operan a presiones superiores a 10 bar, se recomienda que las tapas, superior e inferior, sean elipsoidales pues éstas proporcionan el cierre más económico y apropiado. La mayor parte de estas cubiertas se fabrican con una relación estándar eje mayor/eje menor = 2/1. Para esta relación, se utiliza la siguiente ecuación para determinar el mínimo espesor necesario:

$$t' = \frac{P D_{\text{interior}}}{2J S - 0,2P} \quad [3.38]$$

de donde resulta:

$$t' = 0,3 \text{ in } \leftrightarrow 8 \text{ mm}$$

▪ **Peso del recipiente**

El peso aproximado de un recipiente cilíndrico con espesor de pared uniforme y con cierres de tipo hemisférico, elipsoidal o toroidal, se puede calcular a partir de la ecuación:

$$W = C_c m D_m g (h + 0,8D_m) t 10^{-3} \quad [3.39]$$

donde:

W : peso total excluyendo escaleras, plataformas para columnas... [N]

C_c : factor de corrección que tiene en cuenta elementos internos = 1,08

h : longitud de la sección cilíndrica = 28 m

g : aceleración de la gravedad = 9,81 m/s²

t : espesor de la pared cilíndrica = 17,8 mm

ρ_m : densidad del material de construcción = 7960 kg/m³

$D_m = \frac{1}{2} (D_{\text{interior}} + D_{\text{exterior}}) = 0,51 \text{ m}$

De donde resulta:

$$W = 29233 \text{ N} \leftrightarrow 2980 \text{ kg}$$

Para esta columna se utilizará un soporte tipo falda, que debe estar diseñado para resistir el peso del recipiente y su contenido. Este soporte consiste en una carcasa cónica o cilíndrica soldada a la base del reactor, y cuyo espesor no debe ser inferior a 6 mm.

3.2.2.7. Resumen de resultados

En la tabla 3.21 se resumen los resultados obtenidos en cuanto al diseño de la primera columna de destilación (D-310), tanto del relleno como del recipiente:

Tabla 3.21. Resumen de resultados del diseño de D-310.

Tipo de columna		Relleno
Relleno	Tipo	Anillos Pall
	Material	Acero AISI 316
	Diámetro (mm)	25
Altura de relleno (m)		31
Material del recipiente		Acero AISI 316
Espesor de la pared (mm)		18
D _{ext} (m)		0,52
Peso del recipiente (kg)		2980

4. SERVICIOS GENERALES

4.1. AGUA DE SERVICIOS

El suministro de agua es imprescindible en cualquier planta industrial, aunque tiene una importancia mucho mayor en las plantas químicas, ya que en numerosos casos no sólo se emplea como agua de servicios (para lavado de equipos o para consumo humano) sino que también forma parte del propio proceso de producción.

Es cierto que la demanda de agua a nivel mundial es cada vez mayor, y sin embargo, las cantidades disponibles disminuyen o como máximo son las mismas con el transcurso del tiempo. Es por ello que uno de los objetivos prioritarios en el diseño de una instalación es la utilización y aprovechamiento integral de los recursos hídricos.

El agua que debemos suministrar a la planta va a tener los siguientes usos:

- Agua de refrigeración/calefacción.
- Agua para defensa contra incendios.
- Agua potable-sanitaria.
- Agua para riego de jardines.
- Agua de lavado de equipos.
- Agua de limpieza.

Una vez identificados, deben determinarse cuantitativamente tales requerimientos expresando sus caudales y especificaciones para cada uno de los usos. Finalmente, debe elegirse un tipo de suministro. El suministro de agua puede realizarse a partir de distintas fuente tales como:

- Pozos subterráneos y superficiales
- Manantiales
- Ríos
- Lagos
- Embalses
- Servicios públicos

Así pues, dependiendo de cada tipo de agua, en cada caso concreto será mas acertado un tipo u otro de abastecimiento.

En nuestro proyecto se necesita **agua potable** para consumo humano dentro de la propia planta (vestuarios, oficinas, servicios...), **agua de refrigeración** para el condensador parcial y para los condensadores de las columnas de destilación, **vapor de calefacción** en las calderas de las columnas de destilación, **agua para defensa contra incendios**, que debe tener un abastecimiento independiente y, finalmente, **agua de limpieza**.

Se decidió tomar como suministro de agua en todos los casos el propio suministro del polígono en que se emplaza la planta, cuya calidad es, además, apta para consumo humano.

Desde el punto de vista funcional, las redes de distribución, que en el caso de tuberías para transporte de agua suelen ir enterradas, pueden ser:

- Ramificadas: constan de una arteria principal, de la que van a partir los ramales que alimentarán a las diferentes áreas.
- En anillos: constan de una conducción principal cerrada en anillo, de la que parten las conducciones secundarias que pueden ser o no cerradas.

Para llevar a cabo el suministro en la instalación se ha elegido una red ramificada, debido a la mayor facilidad de distribución. Sin embargo, para el agua de defensa contra incendios se utilizará una red independiente en anillo, con el fin de que en cualquier punto de planta se pueda disponer de ella en caso de emergencia.

Actualmente, para el transporte de agua se suelen emplear tuberías de fibrocemento con diámetro igual o superior a 10 cm. También se pueden emplear tuberías de acero galvanizado en el caso de que se necesiten diámetros de tuberías inferiores.

A lo largo de los siguientes apartados se tratará con mayor detenimiento cada uno de los usos del agua en la planta proyectada, describiendo las cantidades requeridas y sus distintas especificaciones.

4.1.1. Agua de defensa contra incendios

El agua contra incendios dispone de un circuito cerrado independiente, para garantizar su abastecimiento bajo cualquier circunstancia de fallo o error en el suministro de agua de la acometida principal a la planta química.

Además, es imprescindible disponer de depósitos llenos de agua dentro de los límites de batería de la planta, con tomas conectadas a los circuitos de agua contra

incendios. También se requiere disponer de equipos de bombeo especiales para asegurar siempre la cantidad de agua suficiente y a la presión necesaria para poder realizar la labor de extinción de incendios. El objetivo primordial es tener un abastecimiento propio de agua de incendios, en previsión de posibles fallos en la red de abastecimiento.

El circuito cerrado empieza y acaba en dos estanques de almacenamiento de agua al aire libre. Por otro lado, está formado por una red de tuberías subterránea, para evitar la congelación del agua en caso de helada, dotada de válvulas de seccionamiento para el suministro de los distintos subsistemas (hidrantes, rociadores, bocas contra incendios, etc.).

Como exige la Ley se dispone de un almacén de seguridad, que debe asegurar un caudal de $3 \text{ m}^3/\text{min}$ durante 8 horas como mínimo.

En base a esta exigencia, se calcula la cantidad de agua que se debe tener almacenada:

$$3 \text{ m}^3/\text{min} \times 480 \text{ min} = 1440 \text{ m}^3$$

Para lograr una mejor distribución espacial en la implantación de la instalación, se decidió dividir ese volumen en dos estanques. Los estanques adoptaron las siguientes dimensiones, teniendo en cuenta la disponibilidad de espacio en la planta:

Largo: 32 m

Ancho: 10 m

Profundidad: 2,5 m

Cada estanque almacena un volumen de 800 m^3 , con lo que la capacidad total de almacenamiento es de 1600 m^3 de agua, que supera el volumen mínimo estrictamente necesario.

Desde los estanques de almacenamiento debe bombearse el caudal necesario de agua ($3 \text{ m}^3/\text{min} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$) con un sistema especial de bombeo que cumpla las siguientes condiciones:

1. Debe descargar a una presión tal que asegure en todo el circuito $8 \text{ kg}/\text{cm}^2$.
2. Debe tener un dispositivo que asegure siempre presión en el circuito, aún cuando no esté siendo empleado en la extinción de un incendio.
3. Debe tener un grupo de reserva que entre en funcionamiento cuando exista un fallo en el suministro eléctrico. Estos grupos de reserva suelen ser grupos diesel.

Para cumplir todos esos requisitos, dichos sistemas de bombeo están compuestos por tres grupos: una bomba de motor eléctrico, una bomba que funciona con un motor diesel y una bomba *jockey*, que es una bomba de caudal reducido que asegura presión en todo momento y puede reponer las fugas que se produzcan en el circuito.

4.1.2. Agua de refrigeración y vapor de calefacción

En el agua a emplear en el servicio de refrigeración y calefacción, se deben controlar los siguientes parámetros con el fin de evitar incrustaciones, corrosión y eutrofización:

- Contenido en dureza al carbonato.
- Contenido en ácido carbónico libre que, por motivos de corrosión, no deberá sobrepasar el doble de dureza al carbonato.
- Grado de acidez (pH del agua).
- Libre de nítridos y amoníaco.
- Contenido en cloro < 50 mg/L.

De forma orientativa se indican los siguientes valores:

- Dureza al carbonato máxima: 250 ppm CaCO_3 .
- Contenido en ácido carbónico libre mínimo (mg/L): 1,5 veces la dureza al carbonato.
- pH: 7,5 (pH<7,5 → agua ácida, pH>7,5 → agua alcalina).
- Contenido total en sales máximo: 3000 mg/L.
- Sustancias orgánicas máximas: 14 mg/L.
- Contenido en hierro máximo: 0,3 mg/L.
- Contenido en fósforo máximo: 20 mg/L.

El agua suministrada por la red de servicio público del Parque Tecnológico de Andalucía, cumple satisfactoriamente todos los requisitos necesarios para poder ser utilizada con este fin.

Teniendo en cuenta las especificaciones de los equipos, el caudal de agua necesario para llevar a cabo la refrigeración y calefacción es el siguiente:

- Cambiador de calor: 0,6 L/s
- Primera columna:
 - Condensador: 0,05 L/s
 - Caldera: 6,2 L/s
- Segunda columna:
 - Condensador: 0,04 L/s
 - Caldera: 3 L/s

El caudal total de agua para refrigeración es: 0,7 L/s <> 60 m³/día

El caudal total de vapor para calefacción es: 9,2 L/s <> 795 m³/día

4.1.3. Agua potable–sanitaria

El agua para usos sanitarios, engloba aplicaciones tales como agua potable para comedores, vestuarios, duchas, lavabos, laboratorios... y, en general, para cualquier utilización ajena a las operaciones propias de la planta.

La necesidad de agua potable sanitaria para satisfacer y abastecer las instalaciones auxiliares complementarias (servicios, cafetería, laboratorios, talleres, oficinas y resto de edificios civiles) se calcula de acuerdo al consumo previsible.

El circuito de agua potable es otro de los circuitos de agua imprescindibles en cualquier planta de proceso.

Estos sistemas son operados a presiones manométricas entre 1,3 y 2,1 kg/cm², circulando por las conducciones a estas presiones.

El agua para usos sanitarios debe tener las condiciones de calidad mínimas para el consumo y uso humanos. Por ello debe ser potable y estar libre de bacterias patógenas.

Generalmente, en áreas metropolitanas y cercanas a municipios medianos o incluso pequeños, el agua se compra al suministrador municipal correspondiente para este propósito como es nuestro caso.

Para calcular el agua potable necesaria hay que tener en cuenta el número total de personas que trabajan en las instalaciones a lo largo del día. Teniendo en cuenta el consumo de agua potable, incluyendo agua para la cocina, las duchas, los aseos, los retretes..., se requiere entre 120 y 140 L/trabajador/día. Si se toma un valor medio de 130 L/trabajador/día resulta:

$$20 \text{ (trabajadores/día)} \times 0,13 \text{ (m}^3 \text{ agua potable/trabajador)} = 2,6 \text{ m}^3/\text{día}$$

El caudal total de agua potable-sanitaria es 2,6 m³/día

La red de tuberías de agua potable deberá llegar a todos los edificios de la planta debiendo prever, también, las posibles expansiones de la planta. Por tanto, el trazado de la red de tuberías debe tener acceso a todas las parcelas.

4.1.4. Agua para limpieza

El agua para limpieza se va a emplear para diversas operaciones de lavado llevadas a cabo en la instalación, tales como las de limpieza de las áreas de proceso, almacenamiento, calles y aceras, etc.

El único requisito es que esté exenta de sedimentos, por lo que se puede recurrir al abastecimiento por parte de la red pública del Parque Tecnológico de Andalucía.

El circuito correspondiente se inicia en el tanque de almacenamiento de agua para consumo humano y llega hasta las áreas de almacenamiento y procesos. A su vez, dispone de diversas bocas de riego que permiten alcanzar los equipos situados en dichas zonas (tanque de almacenamiento, depósitos, reactores, etc.). Estas bocas de riego son normales, de fundición o de bronce, y se encuentran en el interior de una arqueta colocada junto a los bordillos de las aceras. A esas bocas se les acopla una manguera en su orificio de salida para su utilización. La distancia entre las distintas bocas no debe ser superior a 30 m.

Además, debe existir un circuito independiente que recoja las aguas procedentes del lavado de equipos, así como las aguas de escorrentía superficial producto de las lluvias que serán vertidas a la red de saneamiento público.

Suponiendo que se necesitan del orden de 1,5 L/(m²·día) de agua para la limpieza de las distintas parcelas, y sabiendo que la superficie que ocupan conjuntamente las áreas de proceso (7500 m²) y almacenamiento (1560 m²) asciende a aproximadamente 9000 m²:

$$1,5 \text{ (L/m}^2\cdot\text{día)} \times 9000 \text{ m}^2 = 13500 \text{ L/día} < > 13,5 \text{ m}^3/\text{día}$$

El caudal total de agua de limpieza es 13,5 m³/día

4.1.5. Necesidades de agua totales en la planta

El caudal total de agua calculado para cada una de las aplicaciones anteriormente descritas, está referido a la totalidad de la planta de producción de silicio de grado solar. En la tabla 4.1 se detallan dichas necesidades.

Tabla 4.1. Resumen de necesidades de agua totales de la planta.

Agua de refrigeración - calefacción	855 m ³ /día
Agua potable – sanitaria	2,6 m ³ /día
Agua de limpieza	13,5 m ³ /día
Agua de defensa contra incendios	-
Total	≈ 870 m ³ /día

En esta cifra no se incluye el agua almacenada para la defensa contra incendios porque no es un caudal diario fijo. Los depósitos de este sistema se llenan cuando empieza a funcionar la planta, y el agua no se utiliza hasta el momento en que se produzca una emergencia.

4.2. ENERGÍA ELÉCTRICA

La distribución en la planta se establece mediante circuitos, que se caracterizan y diferencian entre sí fundamentalmente por la tensión transportada. Dada la distribución y estructura de la planta se considerarán cinco redes:

4.2.1. Red de Fuerza: circuito de 400/230 V trifásico.

Esta red suministrará la energía a los equipos de la planta y a los sistemas de transporte. En este caso, las principales necesidades eléctricas son:

Tabla 4.2. Necesidades eléctricas de la red de fuerza

Equipo	Nº equipos	Potencia/Unidad (kW)	Potencia total (kW)
BOMBAS PROCESO			
L-311	1	44	44
L-321	1	6	6
BOMBEO INCENDIOS			
B. Principal	2	16	33
POTENCIA TOTAL			83

Las necesidades de energía aquí descritas corresponden únicamente a la sección del proceso diseñada en el presente proyecto.

4.2.2. Red de Instrumentación y Control: circuito de 12/24 V de CC.

Este circuito de corriente continua proporcionará las señales de transmisión en los lazos de control.

El suministro de corriente continua 12/24 V se realizará a partir de la red de corriente alterna que trabaja a 400/230 V, mediante el empleo de un rectificador de corriente y un transformador reductor de 400/230 V a 12/24 V. El transformador es un motor de inducción trifásico, que actúa como rectificador de corriente estando conectado a un generador de corriente continua con la excitación en paralelo. Este circuito alcanzará todos los sistemas de instrumentación y control de la planta, llegando hasta la sala de control. Su consumo de potencia, teniendo en cuenta que cada lazo de control consume 2 W, es:

Tabla 4.3. Cálculo total de potencia para la red de instrumentación y control

Número de lazos de control	Potencia (kW/lazo)	Potencia total (kW)
10	2	20

La potencia total aquí calculada para la red de instrumentación y control, incluye únicamente la sección de purificación de triclorosilano diseñada en el proyecto.

4.2.3. Red de Alumbrado: circuito de 400/230 V trifásico.

Esta red suministrará la electricidad necesaria para el alumbrado externo y el de los edificios, incluyendo tanto las fachadas como su interior.

Se debe calcular el flujo luminoso total necesario para cada zona, el cual depende de diferentes factores, entre otros, el nivel de iluminación requerido cuyos rangos más comunes para cada zona vienen especificados en la norma UNE-8995. Para el cálculo del flujo luminoso total necesario se aplica la siguiente ecuación:

$$\phi_t = \frac{E A L}{C_u f_m} \quad [4.1]$$

Siendo:

ϕ_t : flujo total necesario en Lm.

E : nivel de iluminación en Lux (depende de la actividad concreta desarrollada)

A : anchura del local o la calle a iluminar en metros.

L : longitud del local o la calle a iluminar en metros.

$C_u = \eta_R \cdot \eta_L$: coeficiente de utilización $\approx 0,72$.

f_m : factor de mantenimiento $\approx 0,80$.

4.2.3.1. Alumbrado de interiores

Se calcula teniendo en cuenta la superficie interior a iluminar y el nivel de iluminación requerido en cada zona, obteniéndose:

Tabla 4.4. Distribución para el alumbrado de interiores.

Local	S (m ²)	E (lux)	Flujo (lm)
Control entrada	2x90	200	62500
Zona de proceso	225	300	117188
Sala control, Oficinas, Laboratorios	2320	1000	4027778
Vestuarios	100	100	17361
Almacenamiento de MP	1560	300	812500

Considerando que las lámparas a utilizar pueden tener un rendimiento lumínico aproximado de 80 lúmenes por vatio, se requiere un total de **63 kW**.

4.2.3.2. Alumbrado de exteriores

Se calcula teniendo en cuenta la importancia de cada una de las vías que recorren el interior de planta y los requisitos de iluminación estipulados para cada una de ellas, obteniéndose:

Tabla 4.5. Cálculo de luminarias para el alumbrado externo.

Calles	L(m)	A(m)	S(m ²)	E(lux)	Φ
1	220	14	3080	100	534722
2	70	7	490	100	85069
3	70	7	490	100	85069
4	70	7	490	100	85069
5	70	7	490	100	85069
6	220	7	1540	100	267361
7	140	7	980	100	170139
8	220	7	1540	100	267361
9	140	7	980	100	170139

Considerando que las lámparas a utilizar pueden tener un rendimiento lumínico aproximado de 110 lúmenes por vatio, se requiere un total de **16 kW**.

4.2.3.3. Alumbrado exterior de edificios y aparcamientos

Se calcula el número de lámparas teniendo en cuenta el perímetro de cada edificio y que se debe colocar una lámpara cada 15 m.

Tabla 4.6. Cálculo de luminarias para el alumbrado exterior de edificios y aparcamientos.

Edificio	Perímetro	Nº lámparas
Laboratorio/Sala Control/Oficinas	105	7
Zona de proceso	200	14
Aparcamiento vehículos	100	7
Aparcamiento camiones	70	5
Control entrada	2x13	2
Almacenamiento de MP	85	6
Zona de ampliación	85	6

Cada una de las lámparas empleadas en el alumbrado de la parte exterior de los edificios tiene una potencia de 250 W, por lo que la potencia total será de **12 kW**.

Esta potencia calculada para las diferentes redes de alumbrado corresponde a la totalidad de la planta de producción de silicio de grado solar.

4.2.4. RED DE SEGURIDAD: CIRCUITO INDEPENDIENTE DE 400/230 V TRIFÁSICO.

La red de seguridad es un circuito independiente que se extiende por todas las instalaciones. Su objetivo es suministrar la energía eléctrica necesaria para el alumbrado, el control e instrumentación y los equipos esenciales en caso de emergencia y, en el peor de los casos, para la parada de la planta bajo condiciones seguras.

Esta red mantiene al 20 % el suministro eléctrico de los sistemas vitales de proceso y control e instrumentación, así como de los sistemas no vitales.

4.2.5. RED DE COMUNICACIONES: CIRCUITO DE 400/230 V TRIFÁSICO.

La red de comunicaciones la constituyen la red telefónica y la de ordenadores.

Para las comunicaciones se emplea la red de telefonía interna, que se distribuye por toda la planta hasta los lugares de trabajo para permitir la comunicación con la sala de control. Se colocarán dispositivos de doble entrada con capacidad de escucha y comunicación.

Simultáneamente existirá una red inalámbrica (móviles, etc.), que acompaña a la anterior pero sin poder sustituirla especialmente en las zonas que entrañan especial peligro.

Adicionalmente existe una conexión a la red telefónica nacional mediante fibra óptica denominado DSL, lo que permite todos los servicios (Internet, fax, etc.) de dicha tecnología. Siempre quedará una línea de conexión directa con los servicios de emergencia y autoridades competentes.

De forma aproximada se puede suponer un consumo de potencia en esta red, para toda la planta, de **1 kW** para conexiones internas y externas.

4.2.6. NECESIDADES ENERGÉTICAS TOTALES PARA LA PLANTA.

A continuación, en la tabla 4.7 se detallan las necesidades de energía eléctrica para la totalidad de la planta de producción de silicio de grado solar.

En los apartados anteriores se ha estimado el consumo de energía de la red de fuerza e instrumentación y control, únicamente para la sección del proceso diseñada en el proyecto. En cambio, para el cálculo de la necesidad energética de las otras

redes se ha considerado la planta completa. Por lo tanto, para unificar criterios se va a referir el consumo energético a la totalidad de la planta. Para ello se ha encontrado en bibliografía [38] que el consumo de una planta de estas características se puede estimar en función de los kg de silicio de grado solar producidos. Se estima que se consumen 100 kWh por cada kg de silicio de grado solar producido. Si se producen 250 kg/día \approx 10,5 kg/h de silicio de grado solar, entonces para esta capacidad de producción se requieren un total de 1050 kW.

Tabla 4.7. Resumen de las necesidades energéticas totales de la planta.

Red de fuerza	1050 kW
Red de instrumentación y control	
Red de alumbrado	91 kW
Red de seguridad	-
Red de comunicaciones	1 kW
Total	\approx 1150 kW

5. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

5.1. CONTROL DEL PROCESO

Para lograr el objetivo del proceso, los equipos que lo integran deben operar correctamente desde que el sistema arranca hasta que, dependiendo de los periodos de tiempo establecidos se paren para posteriores planes de mantenimiento predictivo, preventivo y por último correctivo. Durante el funcionamiento, el proceso esta sujeto a perturbaciones e influencias externas inevitables; estas perturbaciones obligan a ejercer una vigilancia continua sobre el proceso y también a actuar constantemente sobre el mismo con el objeto de corregir las posibles desviaciones que se detecten.

El objetivo básico que debe satisfacer cualquier sistema de control es alcanzar un grado de operación seguro y estable. La seguridad es un requerimiento primario para evitar accidentes, tanto humanos como materiales y medioambientales, esta ligada a que determinadas variables de operación, tales como presión y temperatura, no superen determinados valores limite. El otro requerimiento indispensable para que el sistema de control actúe eficazmente es lograr una operación estable, es decir, sin llegar a grandes oscilaciones en las variables que pudieran llevar el proceso a situaciones peligrosas o a periodos durante los cuales el producto obtenido esta fuera de especificaciones.

El sistema de control debe también impedir que se violen las restricciones de operación de los equipos para evitar el deterioro de los mismos o caídas de rendimiento inaceptables. En las columnas de destilación, por ejemplo, el caudal de vapor que asciende por la columna esta acotado tanto inferior como superiormente, un caudal de vapor excesivamente bajo, debido a un aporte de calor insuficiente en la caldera, provocaría un lagrimeo de los platos, con la consiguiente perdida de eficacia.

En el proceso, las unidades en las que se debe realizar el control son el cambiador de calor, el separador flash y las columnas de destilación.

El control que se va aplicar en el proceso es un control multivariable (MIMO), que consiste en una técnica de control que se construye partiendo de la base de que una variable manipulada afecta a varias variables controladas del proceso. Por tanto, cualquier acción correctora que se tome sobre una variable manipulada para corregir una desviación en una variable controlada, perturbará a las demás variables controladas.

Este efecto es especialmente importante en las columnas de destilación debido a que son unidades con fuertes interacciones. Por ejemplo, ante una desviación en una variable controlada como la composición del destilado, el controlador multivariable actuará simultáneamente sobre todas las variables manipuladas, de forma que las restantes variables controladas no se vean afectadas.

Los lazos de control de la planta, que describiremos a continuación detalladamente, se agrupan por secciones de tal forma que como máximo cada 16 lazos existe un microprocesador que se encarga de controlar cada uno de los procesos. Aquellos instrumentos (indicadores y registros) que no forman parte de ningún lazo de control sino que únicamente son útiles para conocer cada una de las variables de importancia de nuestra planta se encontraran conectados a un multiplexor que será el que envíe la señal correspondiente al siguiente nivel de control.

Todos estos elementos envían su información a un servidor que se encuentra conectado a la sala de control de la planta. Desde allí puede llevarse a cabo el control de supervisión, así como la dirección de la planta. Es posible monitorizar cada una de las secciones y coordinarlas entre si de tal forma que se tenga un control de todo el procedimiento.

Para que todo este sistema de control sea eficaz debemos contar con un sistema de transmisión de señales suficientemente rápido y por tanto se usaran instrumentos digitales.

5.1.1. Condensador parcial (E-110)

En esta unidad se debe controlar la temperatura de salida del fluido caliente para que se mantenga en el valor de consigna, para ello se instala un lazo de control cuya función sería la de controlar la temperatura de salida, es decir, en el caso de que la temperatura de salida es superior a la del punto de consigna se aumenta el caudal de refrigerante accionando la válvula que controla el mismo, en el caso contrario en el que la temperatura de salida es inferior al valor de consigna se realizaría la acción contraria.

También se colocan medidores-indicadores de temperatura en todas las corrientes, con el fin de tener mas controlado el equipo.

5.1.2. Separador (D-210)

En el separador flash lo que se pretende es separar las fases que se han generado en la unidad anterior, debido a que parte de los compuestos condensaron y otra parte no lo hicieron.

Se efectúa una medida e indicación de las variables de la corriente de alimentación, habiendo situado controladores para cada una de ellas (caudal presión y temperatura) con el fin de que si los valores medidos no corresponden con los de consigna, se pueda actuar sobre los mismos.

En la corriente de salida de la fase líquida se mide y controla la presión y temperatura, de forma que si no toma el valor especificado, se actúa, mediante un lazo de control, sobre la válvula de entrada de alimentación, con el fin de modificar el valor de caudal de esta corriente.

En el separador se mide la presión, tanto en cabeza como en cola, y esta conectada a una alarma que en el caso de que la presión supere un cierto valor crítico activa un disco de ruptura situado en la parte superior del equipo.

5.1.3. Columnas de destilación (D-310 y D-320)

Se trata de dos columnas de destilación simples, cada una de ellas con una corriente de alimentación y solo dos corrientes de producto (destilado y residuo). Las variables a controlar son los niveles de líquido en el tanque de reflujo y en el fondo de la columna, la presión en la columna y las concentraciones tanto del destilado como del residuo. También existen cinco variables de control que pueden manipularse mediante válvulas, estas son: los caudales de destilado y residuo, el caudal de reflujo, el caudal de vapor calefactor en la caldera y el caudal de agua de refrigeración en el condensador. Además existen numerosas variables de perturbación, como el caudal, la composición y la temperatura de la alimentación, la presión de suministro de vapor calefactor o la temperatura del agua de refrigeración. Cualquiera de estas variables de entrada afecta a varias variables a controlar, lo que lleva al problema del emparejamiento de variables controladas y manipuladas para formar lazos de control.

En este caso los lazos únicamente no son suficiente, debido a que hay que actuar sobre múltiples variables de entrada y salida, por lo que para ello se introduce un controlador multivariable, desde el cual se fijan puntos de consigna para la concentración de salida de destilado y residuo (respectivamente en cada una de las columnas), el caudal de alimentación, el caudal de recirculación en el condensador

(según la razón de reflujo) y el caudal de vapor calefactor que se introduce en la caldera.

En la propia columna se debe medir e indicar la presión, tanto en cola como en cabeza, debiendo estar controlada para no superar un valor de consigna pro encima del cual se activa una alarma de alta presión y un disco de ruptura.

En la línea de salida pro cabeza y cola de columna se mide e indica la temperatura con el fin de tener bien controlada la corriente.

Tanto en el condensador como en la caldera se debe controlar el nivel de liquido, con el fin de que no se supere un valor máximo ni mínimo y para ello el controlador de nivel actúa sobre la válvula de salida del condensador y caldera, abriendo o cerrando según sean las necesidades.

5.2. INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO

Las variables básicas en los procesos de industria pesada como el nuestro corresponden: caudal, presión y temperatura. Existe otra variable asociada a la calidad de los productos detectada por medio de analizadores, la composición.

Cada variable tiene su propia característica independiente de la aplicación particular. El conocimiento de estas características es muy útil a la hora de diseñar o ajustar un lazo de control. El caudal es la variable con mayor velocidad de respuesta, mientras que la composición es la variable con mayor retardo.

Presión, nivel y temperatura tienen tiempos de retardo intermedios en el orden citado.

5.2.1. Instrumentación seleccionada

Para llevar a cabo una correcta selección de los instrumentos necesarios en la instalación se han seguido los siguientes criterios:

- Se trabaja con una mezcla de compuestos muy tóxicos, corrosivos y pirofóricos, por lo que el material de construcción de estos instrumentos ha de ser de acero inoxidable, preferentemente de acero inoxidable AISI 316.
- La temperatura y presión de operación son variables a tener en cuenta a la hora de elegir un instrumento, ya que este debe soportar el rango en el que se mueven estas variables durante el proceso.

- Los caudales son importantes a la hora de seleccionar medidores y controladores de flujo másico, tanto para gases como para líquidos.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente se llevo a cabo la selección de la instrumentación requerida en la instalación, la cual se detalla a continuación:

Tabla 5.1. Información relativa a la instrumentación requerida en la planta.

Instrumento	Casa comercial	Modelo	Material de construcción	Rango de operación
Medida de T: Termopar	Thermocoax	Tipo K	Acero inox. 304L	-200°C -1000°C
Indicador-controlador de T	Honeywell	SA-90 series	---	T y P ambiente
Regulador de P	Veriflo	SQ-130E	Acero inox. 316L	P _{máx.} : 70 bar
Transductor de P	Veriflo	EXACT serie	Hastelloy C-22	-20°C - 105°C
Indicador-controlador de P	TOHO	TTM-005	---	T y P ambiente
Medidor-controlador de flujo másico para líquidos	Iberfluid	Liqui-Flow L-30	Acero inox. 316L	F _{máx.} : 20kg/h
Medidor-controlador de flujo másico para gases	Iberfluid	EI-Flow F-201C	Acero inox. 316L	F: 0-1250l/min P: 0-400 bar
Medidor-controlador de nivel	Iberfluid	Sentri SR	Acero inox. 316L	0,4 m –25 m
Válvula de bola	Whitey	42 S4	Acero inox. 316L	P _{máx.} : 17.2 Mpa
Válvula de compuerta	Ringo Válvulas	API-600	Acero inox. 316L	P _{máx.} : 150 bar
Válvula de retención	Ringo Válvulas	API-602	Acero inox. 316L	P _{máx.} : 150 bar
Válvula de mariposa	Ringo Válvulas	API-599	Acero inox. 316L	P _{máx.} : 150 bar
Disco de ruptura	Donadson SDD	STD	Acero inox. 316L	P: 6 – 4000 bar T: -196 a 450°C
Bomba centrífuga	Itur	HP/HPW	Acero inox. 316L	P _{máx.} : 30 bar
Compresor	CompAir	D-75-10A	Acero inox. 316L	P _{máx.} : 250 bar

5.3. DIAGRAMAS P&D

Llevamos a cabo los diagramas de tuberías e instrumentos de nuestra planta por secciones partiendo del objetivo de mantener las variables de operación de diseño con una cierta flexibilidad para poder controlar la producción. Para ello dividiremos la planta en tres secciones principales (condensación parcial, separación, unidades de destilación) por la interrelación existente entre los equipos de cada una.

Estos diagramas de instrumentación y control serán completados con análisis Hazop de tal forma que se garantice la total seguridad en operación, los diagramas de instrumentación y control se adjuntan en el anexo 1.

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para llevar a cabo la ejecución práctica de cualquier proyecto es necesario realizar una estimación económica del mismo. Su finalidad es comprobar si va a ser un proyecto rentable económicamente, debido a que en caso contrario no tendría sentido dicha ejecución.

Se denomina rentabilidad a la ventaja obtenida por unidad monetaria invertida, a lo largo del periodo contable para la misma, generalmente, un año. La rentabilidad se calcula como el cociente entre los beneficios obtenidos y el capital invertido. A su vez, los beneficios pueden definirse como la diferencia entre el precio de venta de un producto y los costes de producción del mismo.

La evaluación de la rentabilidad de un negocio y los factores que inciden en el mismo es fundamental, ya que la rentabilidad es la clave de la producción. De hecho, si un proyecto es técnicamente perfecto pero económicamente inviable no se podrá llevar a cabo.

Para realizar un estudio completo acerca de si se invierte o no en un proyecto hay que tener en cuenta, además de la rentabilidad, cada uno de los siguientes términos:

- Inversión: las unidades económicas necesarias para disponer de los medios de producción. Está formado por el capital inmovilizado, el previo y el circulante.
- Los costes de producción
- El precio de venta del producto.

A continuación, se detallan cada una de las partidas necesarias para realizar el análisis económico del proyecto.

6.1. CAPITAL

Por efecto del ciclo económico de producción los bienes cambian de entidad y de valor, quedando en todo momento un fondo patrimonial que es capital actual de la empresa. Este capital es susceptible de ser expresado en unidades monetarias, y resultará mayor o menor en cada momento según el éxito que acompañe a la explotación.

La parte del capital empleada en la adquisición de los medios transformadores (máquinas, aparatos, etc.) está inmovilizada, de ahí que a esta fracción se le llame **capital inmovilizado**. Si se movilizara, la fabricación resultaría dificultada o impedida. Este capital se pierde paulatinamente, de ahí la característica del inmovilizado de ser amortizable. La amortización, que es un coste, responde a una previsión cuyo objeto es compensar la creciente minusvalía del capital inmovilizado.

Además del que se aplica como inmovilizado, hace falta emplear otra cantidad de capital para comprar materias primas, materias auxiliares, etc., de cuyo importe no se puede resarcir la empresa hasta que el ciclo de la fabricación esté concluido, vendido el producto y cobrado su importe. Este capital que ha de estar disponible durante la producción es el **capital circulante**. Por su naturaleza se comprende que este capital no tiene que ser amortizado, pues o es dinero efectivo (disponible) o está en forma de productos que fácilmente pueden ser convertidos en dinero (realizable).

Por otra parte para constituir una sociedad se precisa de un **capital previo** con el que subvenir los gastos de gestión, escrituración y registro de la sociedad, pago de investigaciones, estudios, etc., que no formará parte directa del ciclo de producción. El capital previo es inmovilizable. Sin embargo, su inmovilización no viene impuesta, como en el capital inmovilizado, por las conveniencias de la producción, sino simplemente porque es irrealizable, ya que, por lo general, su valor perece con el objeto estricto para el que se ha creado.

6.1.1. Capital inmovilizado

Lo constituyen las inversiones inmediatamente necesarias para disponer de los bienes de producción, que son, en términos generales para la industria química, las siguientes:

- Maquinaria y aparatos.
- Gastos de instalación de maquinaria y aparatos.
- Tuberías y válvulas.
- Instrumentos de medición y control de cada aparato, de cada zona de la planta o de la fábrica entera.
- Aislamientos caloríficos.
- Instalación eléctrica.
- Terrenos y edificios.
- Instalaciones auxiliares: luz, agua, vapor,... y servicios en general.

- Honorarios del proyecto y dirección de montaje: suelen oscilar entre el 4 % y el 5 % de la suma de las partidas anteriores.
- Contrata de obras: suele suponer entre el 15 % y el 20 % del coste de la obra.
- Gastos imprevistos: entre todos los conceptos, se pueden situar entre el 15 % y el 25 % del coste total de la obra.

El cálculo del capital inmovilizado se va a realizar estimando en primer lugar la partida de máquinas y aparatos, para lo cual se puede hacer uso de diferentes métodos (método de Williams, métodos gráficos...). Una vez calculado su importe, se lleva a cabo una estimación del resto de partidas que constituyen el capital inmovilizado utilizando el método de los porcentajes. Este método se basa en estimar cada una de ellas como un porcentaje de la partida de máquinas y aparatos previamente calculada.

6.1.1.1. Estimación de la partida de máquinas y aparatos

En este proyecto ha de calcularse concretamente el valor de los equipos principales de la unidad de separación: el condensador parcial, el separador gas/líquido, la primera columna de destilación y la segunda columna de destilación. Sin embargo, para poder realizar una valoración económica global del proceso han de incluirse, además, los precios relativos al reactor de síntesis, los filtros separadores de las partículas sólidas de silicio y el reactor de deposición. El precio asignado a estos tres últimos equipos ha sido obtenido a partir de datos referentes a una planta con una producción de 100 kg/día de silicio de grado solar. Así, para adecuar su precio a la capacidad de producción de la instalación objeto de diseño en este proyecto, se utiliza el método de Williams [31] que es válido para aparatos idénticos, construidos con el mismo material y con la misma aplicación. La fórmula del método de Williams es:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^b \quad [6.1]$$

donde:

p : coste del aparato.

c : capacidad de producción del aparato.

b : constante del cambio de escala que toma valores entre 0 y 1. En este caso se toma el valor de 1, con objeto de que si se ha de cometer algún error sea por sobredimensionamiento.

Tabla 6.1. Precios de los equipos estimados con el método de Williams.

APARATO	PRECIO (€)
Reactor de síntesis	125000
Separador de partículas	19000
Reactor de deposición	1000000

El precio de los equipos de la unidad en la que se centra el presente proyecto, es decir, el condensador parcial, el separador gas/líquido y las dos columnas de destilación, se ha calculado a partir de gráficas de bibliografía [28], en las cuales a partir de los parámetros geométricos de dichos equipos se obtiene su coste aproximado, corregido por unos factores que dependen del material de construcción y de la presión de trabajo. De este modo, se obtuvieron los precios que figuran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Precios de los equipos estimados con gráficas.

APARATO	PARÁMETRO FUNCIONAL		MATERIAL	PRECIO (€)
	parámetro	valor		
Condensador parcial	$A_{transferencia} (m^2)$	8	acero inoxidable	6000
Separador gas/líquido	altura (m)	0,4	acero inoxidable	10000
Columna 1	nº etapas de equilibrio	172	acero inoxidable	127000
Columna 2	nº etapas de equilibrio	226	acero inoxidable	152000

La suma de todos los aparatos es el total de la primera partida del capital inmovilizado, la partida de máquinas y aparatos, que asciende a un total de:

Partida de máquinas y aparatos: 1439000 €

Es conveniente realizar un análisis de este resultado, para ver cuál de las secciones del proceso es la de mayor peso en esta partida.

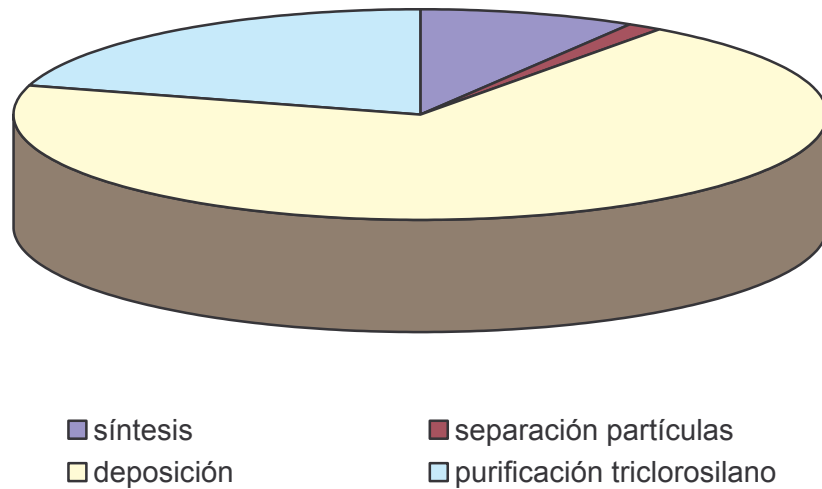


Figura 6.1. Comparación del precio de los equipos de las diferentes secciones del proceso.

Como puede observarse en la figura 6.1, la sección de deposición es la que supone un mayor coste dentro de la partida de máquinas y aparatos. Esto es debido a la complejidad del reactor de deposición, en el que el triclorosilano de elevada pureza se vaporiza y diluye con hidrógeno, para descomponerse a aproximadamente 1100 °C obteniendo grandes barras de silicio ultrapuro.

Por otro lado, si el análisis anterior se centra en la sección de purificación de triclorosilano resulta:

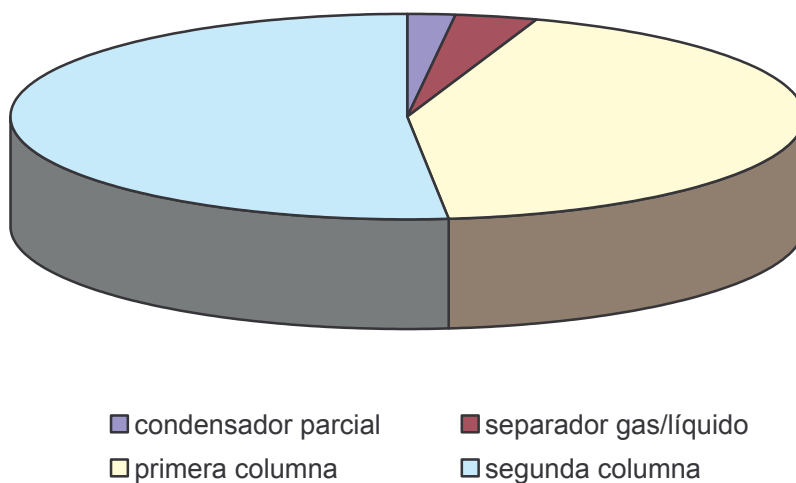


Figura 6.2. Comparación de precio de equipos de la sección de purificación de triclorosilano.

De acuerdo con la figura 6.2, los equipos de mayor coste en esta sección son las columnas de destilación, siendo para la segunda de ellas mayor que para la primera. Esto es lógico puesto que la segunda cuenta con un mayor número de platos. El hecho de que las columnas sean los equipos más caros era de esperar, teniendo en cuenta sus dimensiones.

6.1.1.2. Estimación del capital inmovilizado total

Las demás partidas del capital inmovilizado se calculan como un porcentaje de la partida de máquinas y aparatos, siguiendo el método de los porcentajes [31].

Tabla 6.3. Método de los porcentajes para la estimación del capital inmovilizado.

Concepto		Coste
Máquinas y aparatos		X
Grupo 1	Instalación de máquinas y aparatos	$(0,35 - 0,50) \cdot X$
	Tuberías	$(0,10 - 0,60) \cdot X$
	Instrumentación	$(0,20 - 0,50) \cdot X$
	Aislamientos	$(0,05 - 0,10) \cdot X$
	Instalación eléctrica	$(0,10 - 0,25) \cdot X$
	Edificios y solares	$(0,35) \cdot X + \text{solar}$
	Servicios generales	$(0,25 - 0,75) \cdot X$
Capital Físico o primario		$Y = X + \text{Grupo 1}$
Grupo 2	Proyecto y dirección de obra	$0,20 \cdot Y$
Capital Directo o secundario		$Z = Y + \text{Grupo 2}$
Grupo 3	Contratista	$(0,04 - 0,10) \cdot Z$
	Imprevistos	$(0,10 - 0,30) \cdot Z$
Capital Inmovilizado		$I = Z + \text{Grupo 3}$

Debe ponerse especial cuidado en la estimación de los siguientes puntos:

- Instalación de maquinaria y aparatos: bancadas, cimientos, anclajes... más o menos complicados en función de la maquinaria y aparatos de la instalación.
- Tuberías.
- Instrumentación.
- Aislamientos: la inversión en aislamientos ha crecido debido al incremento de los precios del petróleo y la energía. Ahora compensa gastar más en el inmovilizado de la instalación, si con eso se va a lograr un mayor ahorro de calor o combustible.
- Edificios y solares: obra civil, urbanización...

- Servicios generales: agua y saneamientos, incluyendo almacenamiento de materias primas, producto final y subproductos. Se suele tomar como el 0,50 de X .
- Imprevistos: errores, accidentes, imprevisiones técnicas, fallos de cálculo... Por lo general, cuanto mayor sea el tiempo y la dedicación a un proyecto, menos imprevistos surgirán y este coeficiente será menor.

A continuación, en la tabla 6.4 se muestra el valor obtenido para cada una de las partidas que conforman el capital físico Y .

Tabla 6.4. Distribución de las distintas partidas que conforman el capital físico (Y).

Partida	% de X	Coste (€)
Máquinas y aparatos	100	1439000
Instalación de máquinas y aparatos	45	648000
Tuberías	30	432000
Instrumentación	40	576000
Aislamientos	5	72000
Instalación eléctrica	20	288000
Edificios	35	504000
Solar	-	450000
Servicios generales	25	360000

- Para la partida de instalación de máquinas y aparatos se utilizó un valor medio (45 % de X) dentro del intervalo sugerido, puesto que en esta planta existen algunos equipos de instalación compleja que requieren de la colocación de anclajes y de elevación, como por ejemplo las columnas de destilación.
- En la partida de tuberías se tomó un valor medio del 30 % de X , debido a que el número de tuberías y válvulas necesarias en la instalación no es ni tan elevado como en una refinería, ni tan reducido como podría ser en una planta en la que se manejen únicamente sólidos.
- Para la partida de instrumentación y control se ha adjudicado un 40 % de X porque se necesitan bastantes lazos de control para toda la instalación, en especial en las columnas en las que se requiere un control MIMO.

- La partida de aislamientos es reducida. Se requiere aislamiento principalmente en las tuberías que lleven el vapor de calefacción a las calderas de las columnas.
- En la instalación eléctrica se ha elegido un valor intermedio del 20 % de X .
- Para los edificios y solares se ha tomado el porcentaje típico para obra civil (35 % de X), teniendo en cuenta que esta planta consta de una serie de edificios auxiliares además de viales, aparcamientos, etc. El precio del terreno se ha obtenido a partir de la información proporcionada (150 €/m²) por el Parque Tecnológico de Andalucía.
- A los servicios generales se ha adjudicado un 25 % de X , dado que esta planta no dispone de grandes instalaciones de este tipo.

Sumando todas las partidas anteriores, incluida la de máquinas y aparatos, se obtiene el siguiente valor para el capital físico.

Capital físico (Y): 4767000 €

El capital directo (Z), se obtiene sumando al capital físico (Y) la partida para proyecto y dirección de obra que, a su vez, se estima como un 20 % de Y .

Capital directo (Z): ≈ 5720000 €

Estimando las partidas correspondientes al pago del contratista y a imprevistos como el 4 % y el 10 % del capital directo (Z), respectivamente, el capital inmovilizado (I) de esta instalación asciende a:

Capital inmovilizado (I): 6521000 €

6.1.2. Capital circulante

El capital circulante disponible, que indica dónde está el dinero en efectivo, incluye los siguientes conceptos:

- Existencias en caja, en efectivo.
- Depósitos en bancos, cajas de ahorro y entidades financieras.
- Depósitos de valores: compras de otras empresas, en otros productos (oro...), acciones, participación en otros negocios... Es importante la vinculación con otras empresas que podrían estar relacionadas con la actividad de la empresa.

El importe de estos capitales es consecuencia de la situación de la planta una vez puesta en marcha y tras un cierto tiempo de funcionamiento. Esta valoración queda lejos del alcance del presente proyecto, por lo que el capital circulante se estima de forma global como un porcentaje del capital inmovilizado [31]. El capital circulante, en general, toma un valor de entre el 10 y el 30 % del inmovilizado. En esta instalación el valor del capital circulante no ha de ser muy grande, pues no se requiere de grandes almacenes de materia prima y, además, ésta no tiene un precio demasiado elevado. Tampoco se dispone de grandes instalaciones para el almacenamiento de productos. El silicio de grado solar obtenido al final del proceso va a ser consumido, prácticamente en su totalidad, por la principal empresa (Isofotón) a la que abastecerá la planta objeto del proyecto. Por todo ello, se toma el menor valor del intervalo, es decir, se calcula el capital circulante como el 10 % del inmovilizado.

Capital circulante (P_c): 652000 €

6.1.3 Capital previo

El capital previo es el capital inicial de constitución de la empresa necesario para su creación y puesta en marcha. Este dinero se destina a partidas tales como:

- Establecer las escrituras de la empresa.
- Realizar los ensayos previos del producto.
- Empezar la actividad de la empresa.

Este capital puede ser difícil de evaluar, ya que incluye:

- Valores administrativos: escrituras y trámites burocráticos.
- Investigación, desarrollo e innovación: disposición de la tecnología para el procedimiento.
- Puesta en marcha de la actividad: arranque de la empresa.

En general, al igual que ocurre con el capital circulante, se puede estimar como un porcentaje del inmovilizado que a nivel de planta piloto no supera el 2 % [31]. Tomando este porcentaje como referencia se calcula el capital previo.

Capital previo: 130000 €

6.1.4. Capital total

El capital total necesario para poner en funcionamiento las instalaciones es la suma del inmovilizado, del capital circulante y del capital previo.

Capital total: 7304000 €

6.2. COSTES

El ciclo de producción implica fabricar y vender. Ambas actividades originan unos costes parciales que se agrupan, respectivamente, en lo que se llaman costes de fabricación (o coste industrial) y coste de administración y ventas (o gastos generales). Entonces, con referencia a un ejercicio se tiene:

Costes de Fabricación (Coste Industrial)	M
+ Costes de Administración y Ventas (Gastos Generales)	G
<hr/>	
Costes Comerciales (Costes de Producción)	C

Los costes de producción son los costes que un producto tiene en la puerta de la fábrica, una vez que ya ha sido completamente fabricado, vendido y administrado.

Coste, en general, es el valor expresado en dinero de los bienes y prestaciones consumidos para lograr el objetivo de la empresa que es la producción.

Los costes incluyen asimismo otras partidas de distribución del producto, venta, administración..., que pueden llegar a ser tan importantes o más que los correspondientes a la fabricación del propio producto.

6.2.4. Costes de fabricación

Los costes de fabricación, correctamente ponderados, han de servir como guía para establecer el precio de venta del producto. Estos costes pueden dividirse en las siguientes partidas:

6.2.4.1. Materias primas

La cotización de la mercancía respecto a las condiciones de venta se ha considerado el coste en fábrica, el precio de transporte hasta el cliente y el seguro de transporte.

- Cloruro de hidrógeno: el consumo medio de esta materia prima es de 1200 t/año. Se recibe en estado gaseoso en unos recipientes denominados PT cuya capacidad media es de 500 kg. Su precio lo proporciona la propia empresa suministradora, Praxair, y es de 410 €/t. Por tanto, el gasto en cloruro de hidrógeno asciende a 492000 €/año.
- Silicio de grado metalúrgico: el coste de esta materia prima fue proporcionado por la empresa suministradora, Ferroatlántica, y es de 1300 €/t. Como el consumo medio es de 300 t/año, el coste de esta materia prima asciende a 390000 €/año.

Materias primas: 882000 €/año

6.2.4.2. Mano de obra

A continuación, se describe la plantilla de la planta. Cada trabajador está incluido dentro de un grupo, según el convenio colectivo de la industria química basado en el XII Convenio Colectivo de la Industria Química, teniendo en cuenta la revisión salarial del 2005 y el incremento del 2006, en el cual se establece el salario mínimo anual por grupo profesional.

Tabla 6.5. Distribución de trabajadores en la planta.

Puesto de trabajo		Nº trabajadores en plantilla	Grupo	Coste (€)/trabajador
Director de Producción (Jefe de Planta)		1	7	27000
Responsable de Calidad		1	7	27000
Ingenieros de Proceso		1	7	27000
Control de entrada	Principal	1	3	16000
	Camiones	1	3	16000
Operarios de laboratorio		2	5	20000
Mantenimiento y Talleres		1	3	16000
Oficinas (Administración)		1	4	18000
Sala de Control		2	4	18000
Operarios de explotación		6	3	16000
Vigilancia		3	3	16000

La deposición de silicio, y por lo tanto también el proceso de producción, son discontinuos. Son necesarios dos turnos de trabajo, pero sólo se requieren doblar el número de trabajadores en determinados puestos, por ejemplo en el de director de producción, responsable de calidad, ingeniero de proceso, etc., no es necesario. Únicamente es imprescindible que se encuentren siempre localizables, por si surgiera alguna emergencia. Sin embargo, en otros puestos tales como los de operarios, vigilancia, control..., sí es necesario que en todo momento durante el proceso haya personal presente en la planta. Incluso el personal de vigilancia ha de estar presente aunque la planta no esté funcionando, para maximizar la seguridad en la misma. De hecho, en este caso, se incorpora un turno más para disponer de un total de tres.

Sobre el salario calculado para cada uno de los trabajadores se establecen los incentivos y pluses, que no es posible calcular para la estimación de los costes. Por otro lado, la empresa debe pagar por la seguridad social de cada empleado un 35 % del salario base. Por tanto, el coste total de la mano de obra incluyendo el pago de seguridad social es de:

Mano de obra: 495000 €/año

6.2.4.3. Patentes

Si se está utilizando tecnología no propia, se deben pagar los derechos al autor o autores de las patentes utilizadas. El pago depende de la negociación realizada, unas veces se paga por unidad de producto, otras con una participación en los beneficios, es decir, una fracción de las ventas. Normalmente se utiliza esta última opción, de modo que el coste debido a las patentes se suele estimar entre un 1 y un 5 % de las ventas. En este caso el proceso sigue la patente correspondiente al proceso Siemens. Si se toma esta partida como un 5 % de las ventas (véase apartado 6.3) su coste asciende a:

Patentes: 187000 €/año

6.2.4.4. Servicios generales

En los servicios generales será necesario considerar los costes relativos al suministro eléctrico y al suministro de agua. Estos pueden calcularse de forma aproximada como un 5 % del capital inmovilizado total.

Servicios generales: 326000 €/año

6.2.4.5. Suministro

En esta partida se incluye la compra de los suministros más o menos regulares: caretas, palas, mangueras, impresos para estadillos y anotaciones de control, batas, monos, material de oficina, etc.

Normalmente se considera que esa partida constituye entre un 0,5 y un 2 % del inmovilizado. La elección del valor concreto depende del tamaño de la instalación y la previsión de uso de ciertos utensilios y material adscrito a esta partida. Para la instalación objeto de diseño se ha tomado un 0,5 % del inmovilizado, el menor valor dentro del intervalo puesto que la planta es pequeña y las necesidades de suministros son mínimas.

Suministros: 33000 €/año

6.2.4.6. Conservación y mantenimiento

Se incluyen en esta partida los gastos generados por la revisión periódica de las máquinas y aparatos, la sustitución previsoramente de piezas desgastadas y las

reparaciones que sean precisas para mantener los elementos de fabricación, incluso edificios, en condiciones de funcionamiento eficiente. Los costes de mantenimiento dependen de las condiciones de trabajo y del inmovilizado inicial.

Se va a considerar que la planta forma parte del grupo de industrias químicas con un mantenimiento de pequeña magnitud, que se toma como un 4 % del valor del inmovilizado.

Conservación y mantenimiento: 261000 €/año

6.2.4.7. Laboratorio

Corresponde al laboratorio fabril la vigilancia de la calidad de lo fabricado, interviniendo en la toma de muestras, análisis y dictamen de las materias primas y auxiliares, productos intermedios, y en general, de todas la materias que entren en la planta. El coste de esas actividades ha sido incluido en la partida de mano de obra.

6.2.4.8. Amortización

Esta partida se refiere a la anualidad que deposita la empresa para poder hacer frente, cuando sea preciso, al cambio de máquinas y aparatos que por diferentes causas pierden su utilidad. Estas causas se clasifican en seguras y posibles:

- Seguras:
 - Consumición
 - Tiempo limitado de uso
 - Desgaste
- Posibles:
 - Envejecimiento técnico (obsolescencia)
 - Envejecimiento económico
 - Accidentes que pueden destruir los bienes

Esta anualidad va a depender del valor de compra de la máquina o aparato (valor histórico), del valor que se recibe al deshacerse de ese bien (valor residual), de su vida útil y del criterio de amortización tomado.

En este caso, el valor residual del aparato se considera prácticamente nulo, ya que es muy difícil predecir cuál va a ser el valor de un aparato después de su uso. Es difícil incluso predecir cuál podría ser el valor de los materiales de que están constituidos, por lo que se desprecia este valor sobredimensionando así la amortización.

Se ha considerado una cuota de amortización constante con una vida media de la instalación de 30 años. En el caso de que deba llevarse a cabo una reposición de algún aparato se utilizarán parte de los fondos de reserva. Mediante la amortización uniforme o reparto constante, el coste de amortización por ejercicio se valora como el cociente entre la cantidad a amortizar y el número de ejercicios que pervivirá lo amortizado. En este caso se han supuesto ejercicios anuales y una vida útil total de 30 años.

Amortización: 217000 €/año

6.2.4.9. Alquileres

Esta partida está ligada al caso concreto que se esté analizando por lo que no puede generalizarse. En cualquier caso cabe precisar que el poseer bienes en alquiler supone la reducción del coste de amortización, pues sólo se produce la amortización de aquello que se posee en propiedad.

Como en este caso no se alquila ningún equipo, aparato o servicio este coste es nulo.

6.2.4.10. Impuestos

Esta partida no se refiere a los impuestos que cargan sobre los beneficios, sino los que se gravan a la fábrica y sus terrenos de forma fija. Los más importantes son la contribución urbana y los arbitrios sobre la riqueza provincial.

Normalmente se estiman como un porcentaje del valor inmovilizado, que depende del tamaño de la instalación y los terrenos. En este caso se considerará un 1 % del inmovilizado.

Impuestos: 65000 €/año

6.2.4.11. Seguros

Incluye los seguros de instalaciones, pero no de la protección a los trabajadores, ya considerada en la partida de mano de obra.

Se suelen estimar como un 1 % del capital inmovilizado. Cuanto mayor sea la inversión en seguridad por parte de la empresa, menor es la cuota de seguro que ésta tiene que pagar.

Seguros: 65000 €/año

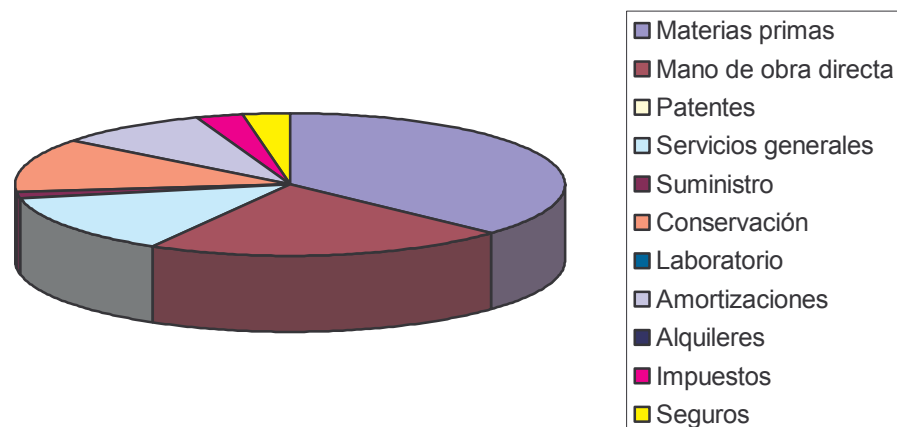
6.2.4.12. Resumen de los costes de fabricación

Tabla 6.6. Resumen de las partidas de los costes de fabricación.

COSTES DE FABRICACIÓN (€/año)	
Materias primas	882000
Mano de obra directa	495000
Patentes	187000
Servicios generales	326000
Suministro	33000
Conservación y mantenimiento	261000
Laboratorio	Incluida en mano de obra
Amortizaciones	217000
Alquileres	0
Impuestos	65000
Seguros	65000

Costes de fabricación: 2532000 €/año

De todos los costes de fabricación es la partida de materias primas la que tiene mayor peso, como se refleja claramente en la figura 6.3.

**Figura 6.3.** Comparación de las partidas de los costes de fabricación.

El hecho de que sea la partida de materias primas la de mayor importancia, seguida de la de mano de obra, indica que la situación se encuentra dentro de la

normalidad. En otro caso, se debería hacer un estudio exhaustivo con la finalidad de disminuir, en la medida de lo posible, la partida en cuestión.

6.2.5. Gastos generales

Los gastos generales se componen de las siguientes partidas:

6.2.5.1. Gastos comerciales

Comprende todos los derivados de la venta de productos, incluyendo representantes, viajantes, propaganda... Varían mucho con el tipo de producto. Son de mínimos gastos comerciales los productos bien asentados en el mercado y que se venden en gran tonelaje y los que por ser productos intermedios, como es este caso, no van directamente al consumidor.

Los gastos comerciales se suelen valorar entre el 5 y el 20 % del coste de fabricación. Aquí serán mínimos, por lo que se toma el menor valor dentro del intervalo, es decir, el 5 % del coste de fabricación.

Gastos comerciales: 127000 €/año

6.2.5.2. Gastos financieros

Se refieren a los intereses del capital prestado puesto en juego en el negocio. Las circunstancias que determinan la inclusión de esta partida son muy variadas. A efectos de estimación, esta partida se puede valorar en un 1,5 % del capital prestado utilizado. Suponiendo, que en el peor de los casos todo el capital necesario tenga que ser prestado, esta partida asciende a:

Gastos financieros: 110000 €/año

6.2.5.3. Servicios técnicos

Se refieren a los servicios especializados que muchas empresas necesitan para asesorar a sus clientes respecto a las mejores condiciones de empleo de sus productos. Puede ser muy variable la amplitud de los mismos. Puede ir desde sólo un

técnico asesor, hasta importantes laboratorios centrales que estudien minuciosamente las circunstancias bajo las cuales se aplican los productos en cada caso.

Esta partida se puede estimar, cuando existe, en un 1 % de los costes de fabricación.

Servicios técnicos: 25000 €/año

6.2.5.4. Gastos de investigación, desarrollo e innovación

Los servicios de investigación dentro de la propia planta se están desarrollando cada vez más, centrándose en aspectos como estudio de nuevas materias primas, nuevos productos, tratamiento de subproductos, mejora de rendimientos, nuevos procesos, etc.

A efectos de inclusión en el coste de producción podría valorarse esta aportación en un 3 % del valor del inmovilizado.

Gastos de investigación, desarrollo e innovación: 196000 €/año

6.2.5.5. Resumen de los costes de fabricación.

Tabla 6.7. Resumen de las partidas de los costes de fabricación.

GASTOS GENERALES (€/año)	
Gastos comerciales	127000
Gastos financieros	110000
Servicios técnicos	25000
Gastos de I+D+i	196000

Gastos generales: 457000 €

6.3. VENTAS

El resultado de toda producción, el producto o el servicio, tiene por destino el ser absorbido por un mercado. El precio que las mercancías tienen en el mercado es algo extrínseco a la propia mercancía, y mide la utilidad que tiene para los contratantes. El valor de una cosa es, en cambio, una característica intrínseca que representa el esfuerzo necesario para haberla producido, en esta ocasión, el coste. La

economía de la producción se basa en la diferencia entre el primero y el segundo, entre el precio y el coste.

El importe de las ventas (V) por ejercicio representa los ingresos primarios de la empresa, y se obtiene multiplicando el número de unidades de producción previstas (q) por el precio de venta unitario (V_1) correspondiente:

$$V = q V_1 \quad [6.2]$$

Las variables q y V_1 no sólo son las más importantes para el correcto pronóstico de un proyecto químico-industrial, sino también las más difíciles de precisar. Los costes de operación y las inversiones se establecen estimativamente con imprecisiones que, en el peor de los casos, pueden llegar hasta un error del 15 %. En cambio, las valoraciones previas de V_1 y q frecuentemente alcanzan errores del 30 % o incluso mayores. Por ello, lo que importa en la previsión de la rentabilidad es el producto de ambas que, lógicamente, resulta afectado por los errores de cada una, con lo que el riesgo del pronóstico económico aumenta enormemente.

Para fijar el precio de venta del silicio de grado solar hay que atender a dos criterios fundamentales.

El primero de ellos es que el resultado de la explotación debe ser positivo, es decir, se tienen que obtener una rentabilidad bruta porcentual definida como:

$$R_{np} = \frac{V - C}{P} 100 \quad [6.3]$$

Se trata de que dicha rentabilidad sea como mínimo de un 20 % para que el proyecto se pueda considerar viable económicamente.

La capacidad de producción de la instalación objeto de este proyecto queda definida por las exigencias de la planta a la que va a suministrar el silicio de grado solar. Concretamente, la capacidad de producción es de aproximadamente 250 kg/día de silicio de grado solar que, tomando 350 días de producción al año, equivale a 87500 kg/año.

Por otro lado, el precio de venta de este producto queda acotado. Hasta el momento la industria fotovoltaica a la que se pretende abastecer ha comprado el silicio a la industria microelectrónica. Las instalaciones objeto de este proyecto supondrían para la industria fotovoltaica disponer de una fuente independiente de silicio de grado solar. Entonces, el precio de venta del silicio de grado solar obtenido en esta planta debe ser menor que el del silicio proporcionado por la industria microelectrónica, con el

fin último de poder abaratar los costes finales de fabricación de los paneles solares y con ello su precio de venta. De este modo se lograría una mayor aplicación de la energía solar y se contribuiría a un desarrollo sostenible.

En base a lo anterior, para obtener una rentabilidad del 20 % el precio de venta del silicio de grado solar ha de ser:

Precio de venta del silicio de grado solar: 43 €/kg

Este precio está dentro de estimaciones realizadas para el año 2006 [37], que suponen un precio para el silicio de grado solar de aproximadamente 38-46 €/kg.

En consecuencia, el importe total correspondiente a las ventas (*V*) de un ejercicio asciende a:

Ventas (*V*): 3736000 €

Es importante comparar el precio del silicio de grado solar obtenido con el precio del silicio de grado semiconductor que, procedente del excedente de la industria microelectrónica, es el material actualmente más utilizado en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos. Este silicio se paga actualmente a 55 €/kg, precio superior al calculado para el silicio de grado solar obtenido en este proceso.

Además, es importante destacar la importancia de disponer de una fuente independiente de silicio para la industria fotovoltaica. Por un lado, porque se prevé que el precio del silicio semiconductor vaya aumentando. La industria microelectrónica está optimizando sus procesos, lo que reduce la cantidad de producto residual que no cumple las especificaciones requeridas y, por lo tanto, puede ser utilizado para abastecer a la industria fotovoltaica. Y, por otro lado, porque la industria fotovoltaica está en pleno auge y cada vez va necesita más silicio para ampliar su mercado. Esto es, a la vez que la oferta se reduce la demanda es creciente, y ello contribuye a una subida del precio del silicio utilizado.

7. ESTUDIO DE SEGURIDAD

Asumida de forma inteligente la existencia de riesgos, es función y obligación de los profesionales implicados en la actividad industrial actuar de las formas siguientes [32]:

- Detectar los riesgos.
- Identificarlos en sus orígenes y consecuencias posibles y probables.
- Medirlos.
- Paliarlos (eliminar o atenuar), reduciendo su frecuencia (probabilidad) y su severidad mediante la prevención en el proyecto y la operación.
- Compararlos con niveles aceptados.
- Paliar (eliminar o atenuar) sus consecuencias mediante defensa pasiva y activa.

7.1. INFORMES Y ESTUDIOS DE PREVENCIÓN DE ACCIDENTES REQUERIDOS

A continuación se detallan los documentos requeridos en materia de seguridad a lo largo de las distintas fases en el inicio del ciclo de vida de la planta.

7.1.1. Estudio de seguridad y salud

El promotor estará obligado a que en la fase de redacción del proyecto, se elabore un Estudio de Seguridad y Salud en los proyectos de obras, en la construcción de la planta. Este Estudio de Seguridad y Salud se basa en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (31/95) y en el **RD 1627/1997** por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción y en la ley de edificación. Su elaboración corre a cargo del técnico competente designado por el promotor. Cuando deba existir un coordinador en materia de Seguridad y Salud durante la elaboración del proyecto, (intervengan varios proyectistas) le corresponderá a este elaborar o hacer que se elabore, bajo su responsabilidad dicho estudio.

El Estudio de Seguridad y Salud deberá formar parte del proyecto de ejecución de obra, siendo requisito necesario para el visado de este por el Colegio Profesional

correspondiente, expedición de la licencia municipal y demás autorizaciones y trámites por parte de las distintas Administraciones Públicas.

En el Estudio de Seguridad y Salud se desarrollará de una forma coherente con el proyecto:

- La problemática específica de seguridad y salud de la obra.
- Los sistemas técnicos adecuados para poder efectuar, en su día los trabajos de reparación, conservación y mantenimiento en las debidas condiciones de Seguridad y Salud. Dichos sistemas técnicos se acomodarán a las prescripciones del proyecto de ejecución de obra, en el que no se podrá introducir modificación alguna.

Su elaboración escapa nuestras competencias puesto que resulta necesario el conocimiento de las técnicas y procedimientos constructivos desde la explanación del terreno hasta la obra civil, suele encargarse a un Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

7.1.2. Plan de seguridad en obra

El Plan de Seguridad y Salud analizará, estudiará, desarrollará y complementará las previsiones contenidas en el Estudio o Estudio Básico en función del sistema de ejecución de la obra, y propondrá, en su caso, medidas alternativas de prevención.

7.1.3. Seguridad durante la producción

La Directiva europea en materia de seguridad en la producción es la Directiva 96/82/CE cuyo objetivo es el de obtener un alto nivel de protección ante accidentes graves para las personas, bienes y medio ambiente, poniendo en marcha medidas orientadas tanto a su prevención, como a la limitación de sus consecuencias. Esta Directiva ha sido incorporada en España con el **Real Decreto 1254/1999** (BOE de 16 de julio) por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

Esta directiva se aplica a establecimientos en los que estén presentes sustancias peligrosas en cantidades iguales o superiores a los umbrales recogidos en su Anexo 1. Dicho anexo consta de dos partes; en la parte 1 aparecen sustancias específicas y en la parte 2 sustancias generalizadas para el caso de que nuestras

sustancias no aparezcan especificadas en la parte 1. En cada una de ellas aparecen cantidades umbrales para dos niveles distintos. Según el nivel en que se encuentren las sustancias peligrosas que contiene la planta química tendremos que cumplir con la ejecución de una serie de informes, acciones y planes.

Las cantidades umbrales para los dos niveles, de las sustancias presentes en nuestra planta se recogen en las siguientes tablas:

Tabla 7.1. Cantidades Umbrales de clasificación de Sustancias Peligrosas Específicas

PARTE 1: SUSTANCIAS ESPECÍFICAS		
Columna 1	Columna 2	Columna 3
Sustancias peligrosas	CANTIDAD UMBRAL [Ton]	
H₂	5	50
HCl	25	250
PH₃	0,2	1
AsH₃	0,2	1

Tabla 7.2. Cantidades Umbrales de clasificación de Sustancias Peligrosas No Específicas

PARTE 2: SUSTANCIAS GENERALIZADAS		
Columna 1	Columna 2	Columna 3
Categorías de sust. peligrosas	CANTIDAD UMBRAL [Ton]	
Muy Tóxico	5	20
Tóxico	50	200

Las fichas de seguridad de los compuestos principales serán proporcionadas por los que van a ser los suministradores de los mismos, Praxair y Ferroatlántica, se adjuntan en el ANEXO 10.

7.1.4. Análisis de Riesgos

La indiscutible necesidad de ciertas actividades, como las que realiza la Industria Química, supone la necesidad de decidir cuál es el nivel de riesgo aceptable o en que medida el riesgo puede ser aceptado en virtud de los beneficios que se derivan al asumirlo.

La cuantificación del nivel de riesgo supone el desarrollo de una estimación cuantitativa del nivel de peligro potencial de una actividad, referido tanto a personas como a bienes materiales, en términos de la magnitud del daño y de la probabilidad de que tenga lugar. Esta estimación recibe el nombre de **análisis de riesgos** y combina la evaluación ingenieril de los procesos con técnicas matemáticas que permiten

cálculos de frecuencias y consecuencias. A partir del análisis de riesgos se valoran las prioridades en las inversiones de seguridad. Las etapas del análisis de riesgos, con carácter general, son las siguientes:

1. **Identificación** de todos los sucesos no deseados que conducen a un peligro, por conocimientos ingenieriles, experiencia previa y sentido común.
2. **Analizar los mecanismos** por los que esos sucesos tienen lugar.
3. **Estimación de los efectos** de esos sucesos no deseados basándose en unos modelos que relacionan las causas con los efectos, y estimación de la frecuencia con que tienen lugar dichos efectos, mediante el análisis de la esperanza matemática del daño.

El análisis de riesgo y operabilidad más adecuado y el que mayor aplicación está teniendo en el diseño y operación de plantas químicas es el análisis HAZOP. Hasta el punto de exigirse, de acuerdo con lo establecido en el artículo 6º y 7º del **R.D. 1254/1999**, dentro de la Información Básica para la elaboración de Planes de Emergencia Exterior (IBA), cuando se haya determinado que pueden existir consecuencias en el exterior de las instalaciones.

Los objetivos principales del análisis HAZOP son:

- Detectar riesgos, sus orígenes, sus consecuencias y sus remedios mediante el análisis, cualitativo pero sistemático y escrupuloso que considera el centro del proceso que son las desviaciones de sus variables.
- Al hacer la identificación sistemática de los riesgos facilita, al discernimiento de los analistas, decidir cuales de éstos deben ser objeto de análisis más afinado mediante métodos más detallados y/o cuantitativos.

De modo que el método HAZOP se basa en los siguientes puntos:

- **Carácter sistemático del análisis:** Se realiza un examen basado en la aplicación sucesiva de una serie de palabras guía, que tienen por objeto proporcionar una estructura de razonamiento, capaz de facilitar la identificación de desviaciones. Cada vez que una desviación razonable es identificada, se analizan sus causas, consecuencias y posibles acciones correctoras, llevándose un registro ordenado de todo ello.
- **Naturaleza multidisciplinar:** El análisis HAZOP se aplica por un equipo, que debe estar formado por personas de distinta procedencia, desde dentro y, a menudo, desde fuera de la empresa o de la planta. El método se basa en el principio de que personas con distinta experiencia y formación pueden interaccionar mejor e identificar más problemas cuando trabajan juntos que cuando lo hacen por separado y combinan después sus resultados.

El análisis HAZOP se realiza sobre plantas en funcionamiento o sobre plantas que aún están por construir. En este último caso, el análisis HAZOP requiere que el diseño esté relativamente definido, para que se pueda disponer de la información necesaria.

En particular, la sistemática del método requiere que los diagramas de líneas e instrumentación (P&IDs) estén completos. A partir de este momento, el análisis HAZOP debe llevarse a cabo lo antes posible, a fin de poder realizar los cambios necesarios con un coste mínimo.

El estudio HAZOP es una de las mejores técnicas de identificación de riesgos debido en parte al carácter sistemático del análisis, ya que se realiza un examen basado en la aplicación de palabras guía que facilitan la localización de las desviaciones, y a estas desviaciones se les estudian las causas, las consecuencias y se les aplica acciones correctivas.

En el ANEXO 11 se adjuntan los análisis HAZOP realizados a cada uno de los equipos del proceso que nos ocupa, detallando en cada caso todas las líneas de entrada y salida de los mismos.

8. ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

En términos generales, la Evaluación de Impacto Ambiental es una herramienta necesaria para paliar los siguientes efectos [33]:

- Carencia de sincronización entre el crecimiento de la población y el crecimiento de la infraestructura.
- Demanda creciente de espacios y servicios a consecuencia de la movilidad de la población y el aumento del nivel de vida.
- Degradación progresiva del medio natural.
- Contaminación y mala gestión de los recursos.
- Ruptura del equilibrio biológico y de las cadenas eutróficas.
- Perturbaciones por desechos o residuos.
- Deterioro o mala gestión del patrimonio histórico-artístico.

La situación actual al realizar un proyecto hace necesario la realización de un estudio de impacto ambiental por numerosas razones:

- Detienen los procesos degenerativos.
- Evitan graves problemas ecológicos.
- Mejoran nuestro propio entorno y calidad de vida.
- Ayudan a perfeccionar el proyecto.
- Definen y justifican la solución acertada.
- Canalizan la participación ciudadana.
- Son exigidos por la legislación vigente.
- Generan una mayor concienciación social ante el problema ecológico.

Los estudios de impacto ambiental son necesarios y con esto, el responsable del proyecto lo será también de que el mismo cumpla las disposiciones y normas medioambientales locales, autonómicas, nacionales e internacionales y europeas.

A continuación se definen los términos más necesarios y usuales en los estudios de evaluación de impacto ambiental, se distinguen tres grupos de conceptos:

- *Adyacentes*: elementos del medio que necesitamos precisar y contemplar.
- *Elementos de proceso*: forman parte del mismo como apartados con unidad propia.
- *Elementos intrínsecos*: características del medio, su definición y cuantificación son necesarios para su incorporación al proceso.

Se dice que hay un **impacto ambiental** cuando una acción o actividad produce una alteración favorable o desfavorable en el medio o en algunos de sus componentes. El impacto de un proyecto sobre el medio ambiente es la diferencia entre la situación del medio ambiente futuro modificado, tal como se manifestaría como consecuencia de la realización del proyecto, y la situación del medio ambiente tal y como hubiese evolucionado sin tal actuación.

La **evaluación de impacto ambiental** es un procedimiento jurídico administrativo que tiene como objetivo la identificación, predicción e interpretación de los impactos ambientales que un proyecto o actividad producirían en caso de ser ejecutados, así como la prevención, corrección y valoración de los mismos con el fin de ser aceptado, modificado o rechazado por parte de las distintas administraciones públicas competentes.

8.1. TÉCNICA DE VALORACIÓN DE IMPACTOS

Existen múltiples técnicas de valoración de impactos, en nuestro caso se va a resumir los factores susceptibles de sufrir impacto y las acciones que nuestro proyecto pueden provocar durante cada una de sus fases sobre cada uno de estos factores.

8.1.1. Sobre la atmósfera

Durante la fase de **construcción**, el impacto más significativo sobre la calidad del aire se debe a la emisión de polvo, motivado por los movimientos de tierra, apenas importantes al tratarse de una planta piloto de pequeño volumen. Otra fuente de contaminación del aire es el tráfico de vehículos y maquinaria pesada empleada durante la fase de construcción, los cuales emitirán compuestos como CO, CO₂, y COVs. El movimiento de tierras y el empleo de maquinaria pesada, en esta fase, modifican los niveles de ruido y de vibraciones del entorno, pudiendo ser afectado el medio. Sin embargo, la envergadura de la obra de construcción de la planta piloto no

es tan grande como la de otro tipo de instalaciones industriales, por lo que las alteraciones al entorno por este motivo no serán excesivas.

En la fase de **explotación**, no hay ninguna emisión gaseosa al exterior, debido a que todas las corrientes secundarias son aprovechadas y enviadas a clientes en las mismas condiciones que salen del proceso. Durante el funcionamiento de la planta, los niveles de ruido se pueden ver incrementados con la llegada de los vehículos de suministro de materias primas y de recogida de productos secundarios. La llegada de estos vehículos se produce con una frecuencia aproximadamente semestral, y se trata de vehículos de tonelaje no elevado, por lo que no se prevé el aumento de los niveles de ruido en la planta por este motivo. Los compresores y las bombas de la planta, así como otros equipos de tipo eléctrico que generan ruido, se encuentran ubicadas en cuartos especiales para amortiguar el posible ruido generado durante su funcionamiento. Debido al carácter de los compuestos que se tratan, estos han de circular por canalizaciones y equipos debidamente estancos, con el fin de que estos compuestos nunca estén expuestos a la atmósfera exterior, evitando así cualquier problema de contaminación u olor.

8.1.2. Sobre el suelo

Las alteraciones producidas sobre este factor se producen principalmente durante la **fase de construcción** de la planta. En esa fase se realizan los movimientos de tierra, dando lugar a cambios en el relieve, que en el caso de nuestra instalación se pueden considerar despreciables. Hay que tener en cuenta que el emplazamiento elegido es una fábrica ya existente, situada en un polígono industrial, por lo que las alteraciones del suelo serán las que cabría esperar de cualquier otra instalación emplazada en ese lugar.

8.1.3. Sobre el agua

En cuanto a los impactos sobre el agua, debe considerarse que la toma de agua necesaria durante el proceso va a realizarse del suministro realizado al Parque Tecnológico de Andalucía, lugar en que la emplazamos, por lo que el único impacto que se produce es el gasto de la misma, pero para nada se afecta a la calidad de ésta, por lo que se va a poder reutilizar durante el proceso y al final verter a la red de saneamiento de dicho polígono, como si de aguas urbanas se tratase, puesto que en ningún momento se ha puesto esta agua en contacto directo con los compuestos a separar.

8.1.4. Sobre la fauna y la flora

Como se ha dicho anteriormente, el emplazamiento seleccionado para la ubicación de nuestra instalación es una zona industrial, que ha sido previamente dividida en parcelas y sobre las que se han construido naves industriales, este efecto sería el que en su día causara alteraciones en la fauna y la flora existente, acciones que no competen al presente proyecto, por lo que podemos afirmar que las alteraciones sobre fauna y flora que se vayan a producir tanto durante la construcción como durante la explotación son inexistentes, debido a que han sido factores previos los que les han visto alteradas.

8.1.5. Sobre el paisaje

Al igual que las alteraciones anteriores, el efecto que se produce sobre el paisaje es nulo, el paisaje ha sido afectado previamente con la construcción del propio Parque Tecnológico en el que ubicamos la instalación.

8.1.6. Aspectos culturales

En el entorno donde se encuentra la planta no se hallan aspectos culturales, restos arqueológicos o edificios históricos. Tampoco se destacan aspectos naturales singulares, con grado o categoría significativos.

8.1.7. Aspectos humanos

En este apartado se refleja el impacto positivo que va a producir la creación de la planta a la hora de crear puestos de trabajo.

No existe ningún riesgo para la salud de los ciudadanos, ni de los trabajadores de la planta durante el normal funcionamiento de la misma.

Además, la planta tiene impacto positivo por el tipo de actividad que en ella se realiza, ya que sin afectar al medioambiente de manera negativa, se está obteniendo la materia prima para la construcción de paneles solares, los cuales van a generar electricidad sin el consiguiente agotamiento de recursos y contaminación que conllevan otros medio de producción de energía.

8.1.8. Infraestructuras

No es necesaria la construcción de ninguna infraestructura, es el polígono el que cuenta con una red de abastecimiento de agua y red de saneamiento a disposición de todas las instalaciones ubicadas en él. Lo mismo ocurre con la energía eléctrica que llega a través de la red del suministrador al polígono y se convierte a las tensiones adecuadas a través de una estación transformadora.

8.2. MEDIDAS CORRECTORAS

Todo Estudio de Impacto Ambiental debe contener el siguiente apartado de medidas preventivas y correctoras que se proponen una vez analizadas las acciones potenciales productoras de impactos, con el fin de eliminar, disminuir o compensar los efectos producidos por las mismas, [33].

Para la corrección de los impactos se marcan tres objetivos:

- Reducir el impacto.
- Cambiar la condición del impacto.
- Compensar el impacto.

La *reducción del impacto* se consigue limitando la intensidad o agresividad de la acción que lo provoca. El *cambio en la condición del impacto* se realiza favoreciendo los procesos de regeneración natural, disminuyendo así la duración de los efectos. La *compensación* se llevará a cabo cuando el impacto sea recuperable, creando cualidades o bienes que compensen los deteriorados o desaparecidos.

En nuestro caso concreto la aplicación de medidas correctoras, se puede reducir únicamente a la aplicación de todas las medidas de seguridad descritas en apartados anteriores con el fin de evitar la pérdida de los compuestos que se tratan debido a su toxicidad y peligrosidad. Siempre y cuando se cumplan todas las medidas de seguridad requeridas y la planta funciones correctamente no se va a producir ninguna alteración medioambiental trascendente, siendo innecesarias las medidas correctoras.

8.3. PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL

Para finalizar el Estudio de Impacto Ambiental, se incluye una planificación de la recogida sistemática de los datos, junto al sistema de organización de la información necesaria para el estudio de la evolución de los impactos medioambientales, sociales y económicos.

El Plan o Programa de Vigilancia y Control [34] permite realizar un seguimiento de las posibles incidencias que vayan surgiendo, y así, observar hasta qué punto se cumplen los objetivos y previsiones marcados, para adoptar, si es necesario, medidas correctoras.

Los objetivos del plan de seguimiento y vigilancia ambiental son:

- Asegurar las condiciones de operación, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento.
- Facilitar la gestión ambiental, permitiendo controlar los efectos no anticipados.
- Proporcionar información para utilizarla en la verificación de los impactos previstos, y mejorar de esa forma las técnicas de predicción de impactos.
- Revisar el plan de seguimiento y vigilancia ambiental.

El alcance y objetivos del Programa de Vigilancia Ambiental vienen establecidos en la legislación de Impacto Ambiental, según el Artículo 11 del RD 1131/88, que dice que: *el programa de vigilancia ambiental establecerá un sistema que garantice el cumplimiento de las indicaciones y medidas correctoras contenidas en el estudio del impacto ambiental.*

Para realizar de forma controlada esta vigilancia ambiental, existe un libro de registro en el que figuran los resultados de los controles establecidos en este Plan de Vigilancia. Además, toda la documentación medioambiental necesaria para las distintas operaciones y elementos de las instalaciones de la planta debe ser actualizada y revisada.

9. PLIEGO DE CONDICIONES

9.1.DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1.-

OBRAS OBJETO DEL PRESENTE PROYECTO.

Se considerarán sujetas a las condiciones de este Pliego, todas las obras cuyas características, planos y presupuestos, se adjuntan en las partes correspondientes del presente Proyecto, así como todas las obras necesarias para dejar completamente terminados los edificios e instalaciones con arreglo a los planos y documentos adjuntos.

Se entiende por obras accesorias, aquellas que, por su naturaleza, no pueden ser previstas en todos sus detalles, sino a medida que avanza la ejecución de los trabajos.

Las obras accesorias, se construirán según se vaya conociendo su necesidad. Cuando su importancia lo exija se construirán en base a los proyectos reformados que se redacten. En los casos de menor importancia se llevarán a cabo conforme a la propuesta que formule el Ingeniero Director de la Obra.

Artículo 2.-

OBRAS ACCESORIAS NO ESPECIFICADAS EN EL PLIEGO.

Si en el transcurso del trabajo se hiciese necesario ejecutar cualquier clase de obras o instalaciones que no se encuentren descritas en este Pliego de Condiciones, el Contratista estará obligado a realizarlas con estricta sujeción a las órdenes que, al efecto, reciba del Ingeniero Director de Obra y, en cualquier caso, con arreglo a las reglas del buen arte constructivo.

El Ingeniero Director de Obra tendrá plenas atribuciones para sancionar la idoneidad de los sistemas empleados, los cuales estarán expuestos para su aprobación de forma que, a su juicio, las obras o instalaciones que resulten defectuosas total o parcialmente, deberán ser demolidas, desmontadas o recibidas en su totalidad o en parte, sin que ello de derecho a ningún tipo de reclamación por parte del Contratista.

Artículo 3.-

DOCUMENTOS QUE DEFINEN LAS OBRAS

Los documentos que definen las obras y que la propiedad entregue al Contratista, pueden tener carácter contractual o meramente informativo.

Son documentos contractuales los Planos, Pliego de Condiciones, Cuadros de Precios y Presupuestos , que se incluyen en el presente Proyecto.

Los datos incluidos en la Memoria y Anexos tienen carácter meramente informativo.

Cualquier cambio en el planteamiento de la Obra que implique un cambio sustancial respecto de lo proyectado deberá ponerse en conocimiento de la Dirección Técnica para que lo apruebe, si procede, y redacte el oportuno proyecto reformado

Artículo 4.-

COMPATIBILIDAD Y RELACIÓN ENTRE LOS DOCUMENTOS

En caso de contradicción entre los Planos y el Pliego de Condiciones, prevalecerá lo prescrito en este último documento. Lo mencionado en los Planos y omitido en el Pliego de Condiciones o viceversa, habrá de ser ejecutado como si estuviera expuesto en ambos documentos.

Artículo 5.-

DIRECTOR DE LA OBRA

La propiedad nombrará en su representación a un Ingeniero, en quien recaerán las labores de dirección, control y vigilancia de las obras del presente Proyecto. El Contratista proporcionará toda clase de facilidades para que el Ingeniero Director, o sus subalternos, puedan llevar a cabo su trabajo con el máximo de eficacia.

No será responsable ante la propiedad de la tardanza de los Organismos competentes en la tramitación del Proyecto. La tramitación es ajena al Ingeniero Director, quien una vez conseguidos todos los permisos, dará la orden de comenzar la obra.

Artículo 6.-

DISPOSICIONES A TENER EN CUENTA

- Ley de Contratos del Estado aprobado por Decreto 923/1965 de 8 de Abril
- Reglamento General de Contratación para aplicación de dicha Ley, aprobado por Decreto 3354/1967 de 28 de Diciembre.
- Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales vigentes del M.O.P.U. - Normas Básicas (NBE) y Tecnológicas de la Edificación (NTE).

- Instrucción EH-91 para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado.
- Métodos y Normas de Ensayo de Laboratorio Central del M.O.P.U.
- Reglamento Electrotécnico de Alta y Baja Tensión y Normas MIBT complementarias.

- Reglamento sobre recipientes y aparatos a presión.
- _ Resolución General de Instrucciones para la construcción de 31 de Octubre de 1.966.

9.2.CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA

Artículo 1.-

REPLANTEO

Antes de dar comienzo a las obras, el Ingeniero Director auxiliado del personal subalterno necesario y con presencia del Contratista o de su representante, procederá al replanteo general de la obra. Una vez finalizado el mismo se levantará acta de comprobación del replanteo.

Los replanteos de detalle se llevarán a cabo de acuerdo con las instrucciones y ordenes del Ingeniero Director de la Obra, quien realizará las comprobaciones necesarias en presencia del Contratista o de su representante.

El contratista se hará cargo de las estacas, señales y referencias que se dejen en el terreno como consecuencia del replanteo.

Artículo 2-

MOVIMIENTO DE TIERRAS

Se refiere el presente artículo a los desmontes y terraplenes para dar al terreno la rasante de explanación, la excavación a cielo abierto realizada con medios manuales y/o mecánicos y a la excavación de zanjas y pozos.

Se adoptan las condiciones generales de seguridad en el trabajo, así como las condiciones relativas a los materiales control de la ejecución, valoración y mantenimiento que especifican las normas:

NTE-AD "Acondicionamiento del terreno".

NTE-AD "Explanaciones".

NTE-ADV "Vaciados".

NTE-ADZ "Zanjas y pozos".

Artículo 3-

RED HORIZONTAL DE SANEAMIENTO

Contempla el presente artículo las condiciones relativas a los diferentes aspectos relacionados con los sistemas de captación y conducción de aguas del subsuelo para protección de la obra contra la humedad. Se adoptan las condiciones generales de ejecución y seguridad en el trabajo, condiciones relativas a los materiales y equipos de origen

industrial, control de la ejecución, criterios relativos a la prueba de servicio, criterios de valoración y normas para el mantenimiento del terreno, establecidas en la NTE “Saneamientos, Drenajes y Arenamientos”, así como lo establecidos en la orden de 15 de septiembre de 1.986, del M.O.P.U.

Artículo 4-

CIMENTACIONES.

Las secciones y cotas de profundidad serán las que el Ingeniero Director señale, con independencia de lo señalado en el Proyecto, que tienen carácter meramente informativo. No se rellenarán los cimientos hasta que lo ordene el Director.

El Ingeniero Director queda facultado para introducir las cimentaciones especiales o modificaciones que juzgue oportuno en función de las características particulares que presente el terreno

Se adoptan las condiciones relativas a materiales, control, valoración, mantenimiento y seguridad especificados en las normas:

NTE-CSZ. “Cimentaciones superficiales. Zapatas”.

NTE-CSC. “Cimentaciones superficiales corridas”.

NTE-CSL. “Cimentaciones superficiales. Losas”.

Artículo 5.-

FORJADOS

Regula el presente artículo los aspectos relacionados con la ejecución de forjados pretensados autoresistentes armados de acero o de cualquier otro tipo con bovedillas cerámicas de hormigón y fabricado en obra o prefabricado bajo cualquier patente.

Las condiciones de ejecución, de seguridad en el trabajo, de control de ejecución, de valoración y de mantenimiento, son las establecidas en las normas NTE-EHU y NTE-EHR así como en el R.D. 1630/1980 de 18 de Julio y en la NTE-EAF.

Artículo 6.-

HORMIGONES

Se refiere el presente artículo a las condiciones relativas a los materiales y equipos de origen industrial relacionados con la ejecución de las obras de hormigón en masa o armado o pretensado fabricados en obra o prefabricados, así como las condiciones generales de ejecución, criterios de medición, valoración y mantenimiento.

Regirá lo prescrito en la Instrucción EH-91 para las obras de hormigón en masa o armado y la instrucción EP-80 para las obras de hormigón pretensado. Asimismo se adopta lo establecido en las normas NTE-EH “Estructuras de hormigón”, y NTE-EME “Estructuras de madera Encofrados”.

Las características mecánicas de los materiales y dosificaciones y niveles de control son las que se fijan en los planos del presente proyecto (Cuadro de características EH-91 y especificaciones de los materiales).

Artículo 7.-

ACERO LAMINADO

Se establecen en el presente artículo las condiciones relativas a los materiales y equipos industriales relacionados con los aceros laminados utilizados en las estructuras de edificación, tanto en sus elementos estructurales, como en sus elementos de unión. Asimismo se afina las condiciones relativas a la ejecución, seguridad en el trabajo, control de la ejecución, valoración y mantenimiento.

Se adoptan lo establecido en las normas:

NBE-MV-102: “Ejecución de las estructuras de acero laminado en edificación”. Se fijan los tipos de uniones, la ejecución en el taller, el montaje en obra, las tolerancias y las protecciones.

NBE-MV-103: “Acero laminado para estructuras de edificaciones”, donde se fijan las características del acero laminado, la determinación de sus características y los productos laminados actualmente utilizados.

NBE-MV-105: “Roblenes de acero”.

NBE-MV-106: “Tornillos ordinarios calibrados para estructuras de acero”.

NTE-EA: “Estructuras de acero”.

Artículo 8.-

CUBIERTAS Y COBERTURAS

Se refiere el presente artículo a la cobertura de edificios con tejas o plaquetas de fibrocemento, tejas cerámicas o de cemento, en el que el propio elemento proporciona la estanqueidad.

Las condiciones funcionales y de calidad relativa a los materiales y equipos de origen industrial y control de la ejecución, condiciones generales de ejecución y seguridad en el trabajo, así como los criterios de valoración y mantenimiento son los especificados en las siguientes normas:

NTE-QTF: "Cubiertas. Tejados de fibrocemento".

NBE-MV-301/1.970 sobre impermeabilización de cubiertas con materiales bituminosos. (Modificada por R.D. 2.085/86 de 12 de septiembre).

Artículo 9.-

ALBAÑILERIA

Se refiere el presente artículo a la fábrica de bloques de hormigón o ladrillo, a tabiques de ladrillo o prefabricados y revestimiento de paramentos, suelos, escalera y techos.

Las condiciones funcionales y de calidad relativa a los materiales y equipo de origen industrial, control de ejecución y seguridad en el trabajo, así como los criterios de valoración y mantenimiento son las que especifican las normas:

NTE-FFI: "Fachadas de ladrillo".

NTE-EFL: "Estructuras de fábrica de ladrillo".

NTE-RPA: "Revestimiento de paramentos. Alicatados".

NTE-RPE: "Revestimientos de paramentos. Enfoscado".

NTE-RPG: "Revestimiento de paramentos. Guarnecidos y enlucidos".

NTE-RPP: "Revestimiento de paramentos. Pintadas".

NTE-RPR: "Revestimiento de paramentos. Revocos".

NTE-RSP: "Revestimiento de suelos y escaleras. Placas".

NTE-RTC: "Revestimiento de techos. Continuos".

NTE-PTL: "Tabiques de ladrillo".

Artículo 10.-

CARPINTERIA Y CERRAJERIA

Se refiere el presente artículo a las condiciones de funcionalidad y calidad que han de reunir los materiales y equipos industriales relacionados con la ejecución y montaje de puertas, ventanas y demás elementos utilizados en particiones y accesos interiores.

Asimismo, regula el presente artículo las condiciones de ejecución, medición, valoración y criterios de mantenimiento.

Se adoptará lo establecido en las normas:

NTE-PPA: "Puertas de acero".

NTE-PPM: "Puertas de madera".

Artículo 11.-

AISLAMIENTOS

Los materiales a emplear y la ejecución de la instalación de aislamiento estarán de acuerdo con lo prescrito en la norma NBE-CB/79 sobre condiciones térmicas de los edificios que en su anexo 5 establece las condiciones de los materiales empleados para aislamiento térmico así como control, recepción y ensayos de dichos materiales, y en el anexo nº 6 establece diferentes recomendaciones para la ejecución de este tipo de instalaciones.

La medición y valoración de la instalación de aislamiento se llevará a cabo en la forma prevista en el presente proyecto.

Artículo 12.-

RED VERTICAL DE SANEAMIENTO

Se refiere el presente artículo a la red de evacuación de aguas pluviales y residuos desde los puntos donde se recogen, hasta la acometida de la red de alcantarillado, fosa aséptica, pozo de filtración o equipo de depuración así como a estos medios de evacuación.

Las condiciones de ejecución, condiciones funcionales de los materiales y equipos industriales, control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento son las establecidas en las normas:

NTE-ISS: "Instalaciones de salubridad y saneamiento".

NTE-ISD: "Depuración y vertido".

NTE.ISA: "Alcantarillado".

Artículo 13.-

INSTALACION ELECTRICA

Los materiales y ejecución de la instalación eléctrica cumplirán lo establecido en el Reglamento Electrotécnico de Alta y Baja Tensión y Normas MBT complementarias. Asimismo se adoptarán las diferentes condiciones previstas en las normas:

NTE-IEB: "Instalación eléctrica de baja tensión".

NTE-IEE: "Alumbrado exterior".

NTE-IEI: "Alumbrado interior".

NTE-IEP: "Puesta a tierra".

NTE-IER: "Instalaciones de electricidad Red Exterior".

Artículo 14-

INSTALACIONES DE FONTANERIA

Regula el presente artículo las condiciones relativas a la ejecución, materiales y equipos industriales, control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento de las instalaciones de abastecimiento y distribución de agua.

Se adopta lo establecido en las normas:

NTE-IFA: "Instalaciones de fontanería".

NTE-IFC: "Instalaciones de fontanería. Agua caliente".

NTE-IFF: "Instalaciones de fontanería. Agua fría".

Artículo 15.-

INSTALACIONES DE CLIMATIZACION

Se refiere el presente artículo a las instalaciones de ventilación, refrigeración y calefacción.

Se adoptarán las condiciones relativas a funcionalidad y calidad de materiales, ejecución, control, seguridad en el trabajo, pruebas de servicio, medición, valoración y mantenimiento, establecidas en las normas:

NTE-ID: "Instalaciones de depósitos".

Reglamento de instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria. (R.D.1618/1.980 de 4 de Julio).

Artículo 16.-

INSTALACIONES DE PROTECCION

Se refiere el presente artículo a las condiciones de ejecución de los materiales, de control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento, relativas a las instalaciones de protección contra fuego y rayos.

Se cumplirá lo prescrito en la norma NBE-CPI-81 sobre condiciones de protección contra incendios y se adoptará lo establecido en la norma NTE.IPP: "Protección contra el fuego", y anejo nº 6 de la EH.82.

Artículo 17.-

OBRAS O INSTALACIONES NO ESPECIFICADAS

Si en el transcurso de los trabajos fuera necesario ejecutar alguna clase de obra no regulada en el presente Pliego de Condiciones, el Contratista queda obligado a ejecutarla

con arreglo a las instrucciones que reciba del Ingeniero Director quien a su vez, cumplirá la normativa vigente sobre el particular. El Contratista no tendrá derecho a reclamación alguna.

Director auxiliados del personal subalterno necesario y con presencia del Contratista o de su representante, procederá al replanteo general de la obra. Una vez finalizado el mismo se levantará acta de comprobación del replanteo.

Los replanteos de detalle se llevarán a cabo de acuerdo con las instrucciones y ordenes del Ingeniero Director de la Obra, quien realizará las comprobaciones necesarias en presencia del Contratista o de su representante.

El contratista se hará cargo de las estacas, señales y referencias que se dejen en el terreno como consecuencia del replanteo.

9.3. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA

9.3.1. OBLIGACIONES Y DERECHOS DEL CONTRATISTA.

Artículo 1.-

REMISIÓN DE SOLICITUD DE OFERTA

Por la Dirección Técnica se solicitarán ofertas a las Empresas especializadas del sector, para la realización de las instalaciones especificadas en el presente Proyecto para lo cual se pondrá a disposición de los ofertantes un ejemplar del citado Proyecto o un extracto con los datos suficientes. En el caso de que el ofertante lo estime de interés deberá presentar además de la mencionada, la o las soluciones que recomiende para resolver la instalación.

El plazo máximo fijado para la recepción de las ofertas será de un mes.

Artículo 2.-

RESIDENCIA DEL CONTRATISTA

Desde que se dé principio a las obras, hasta su recepción definitiva, el Contratista o un representante de él con previo conocimiento del Ingeniero Director y notificándole expresamente, la persona que, durante su ausencia le ha de representar en todas sus funciones. Cuando se falte a lo anteriormente prescrito, se consideraran validas las notificaciones que se efectúen al individuo más caracterizado o de mayor categoría técnica de los empleados u operarios de cualquier ramo que, como dependientes de la contrata, intervengan en las obras y, en ausencia de ellos, las depositadas en la residencia, designada como oficial, de la Contrata en los documentos del proyecto, aún en ausencia o negativa de recibo por parte de los dependientes de la Contrata.

Artículo 3.-

RECLAMACIONES CONTRA LAS ORDENES DE DIRECCIÓN

Las reclamaciones que el Contratista quiera hacer contra las órdenes emanadas del Ingeniero Director, solo podrán presentarlas a través del mismo ante la propiedad, si ellas son de orden económico y de acuerdo con las condiciones estipuladas en los Pliegos de Condiciones correspondientes; contra disposiciones de orden técnico o facultativo del Ingeniero Director, no se admitirá reclamación alguna, pudiendo el Contratista salvar su responsabilidad, si lo estima oportuno, mediante explicación razonada, dirigida al Ingeniero

Director, el cual podrá limitar su contestación al acuse de recibo que, en todo caso, será obligatorio para este tipo de reclamaciones.

Artículo 4.-

DESPIDO POR INSUBORDINACIÓN, INCAPACIDAD Y MALA FE

Por falta del cumplimiento de las instrucciones del Ingeniero Director o sus subalternos de cualquier clase, encargados de la vigilancia de las obras; por manifiesta incapacidad o por actos que comprometan y perturben la marcha de los trabajos, el Contratista tendrá obligación de sustituir a sus dependientes y operarios, cuando el Ingeniero Director lo reclame.

Artículo 5.-

COPIA DE LOS DOCUMENTOS

El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa, de los Pliegos de Condiciones, presupuestos y demás documentos de la contrata. El Ingeniero Director de la Obra, si el Contratista solicita éstos, autorizará las copias después de contratadas las obras.

9.3.2. TRABAJOS. MATERIALES Y MEDIOS AUXILIARES.

Artículo.6.-

LIBRO DE ORDENES

En la casilla y oficina de la obra, tendrá el Contratista el Libro de Ordenes, en el que se anotarán las que el Ingeniero Director de Obra precise dar en el transcurso de la obra.

El cumplimiento de las órdenes expresadas en dicho Libro es tan obligatorio para el Contratista como las que figuran en el Pliego de Condiciones.

Artículo 7.-

COMIENZO DE LOS TRABAJOS Y PLAZO DE EJECUCIÓN

Obligatoriamente y por escrito, deberá el Contratista dar cuenta al Ingeniero Director del comienzo de los trabajos, antes de transcurrir veinticuatro horas de su iniciación: previamente se habrá suscrito el acta de replanteo en las condiciones establecidas en el artículo 7.

El adjudicatario comenzará las obras dentro del plazo de 15 días desde la fecha de adjudicación. Dará cuenta al Ingeniero Director, mediante oficio, del día en que se propone iniciar los trabajos, debiendo este dar acuse de recibo.

Las obras quedarán terminadas dentro del plazo de meses.

El Contratista está obligado al cumplimiento de todo cuanto se dispone en la Reglamentación Oficial de Trabajo.

Artículo 8.-

CONDICIONES GENERALES DE EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS

El Contratista, como es natural, debe emplear los materiales y mano de obra que cumplan las condiciones exigidas en las Condiciones Generales de índole Técnica" del "Pliego General de Condiciones Varias de la Edificación" y realizará todos y cada uno de los trabajos contratados de acuerdo con lo especificado también en dicho documento.

Por ello, y hasta que tenga lugar la recepción definitiva de la obra, el Contratista es el único responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas y defectos que en estos puedan existir, por su mala ejecución o por la deficiente calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que pueda servirle de excusa ni le otorgue derecho alguno, la circunstancia de que el Ingeniero Director o sus subalternos no le hayan llamado la atención sobre el particular, ni tampoco el hecho de que hayan sido valorados en las certificaciones parciales de la obra que siempre se supone que se extienden y abonan a buena cuenta.

Artículo 9.-

TRABAJOS DEFECTUOSOS

Como consecuencia de lo anteriormente expresado, cuando el Ingeniero Director o su representante en la obra adviertan vicios o defectos en los trabajos ejecutados, o que los materiales empleados, o los aparatos colocados no reúnen las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de la ejecución de los trabajos, o finalizados éstos y antes de verificarse la recepción definitiva de la obra, podrán disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas de acuerdo con lo contratado, y todo ello a expensas de la contrata.

Artículo 10.-

OBRAS Y VICIOS OCULTOS

Si el Ingeniero Director tuviese fundadas razones para creer en la existencia de vicios ocultos de construcción en las obras ejecutadas, ordenará efectuar en cualquier tiempo y antes de la recepción definitiva, las demoliciones que crea necesarias para reconocer los trabajos que suponga defectuosos.

Los gastos de la demolición de la reconstrucción que se ocasionen, serán de cuenta del Contratista, siempre que los vicios existan realmente; en caso contrario correrán a cargo del propietario.

Artículo 11.-

MATERIALES NO UTILIZABLES O DEFECTUOSOS

No se procederá al empleo y colocación de los materiales y de los aparatos sin que antes sean examinados y aceptados por el Ingeniero Director, en los términos que prescriben los Pliegos de Condiciones, depositando al efecto el Contratista, las muestras y modelos necesarios, previamente contraseñados, para efectuar con ellos comprobaciones, ensayos o pruebas preceptuadas en el Pliego de Condiciones, vigente en la obra.

Los gastos que ocasionen los ensayos, análisis, pruebas, etc., antes indicados serán a cargo del Contratista.

Cuando los materiales o aparatos no fueran de la calidad requerida o no estuviesen perfectamente preparados, el Ingeniero Director dará orden al Contratista para que los reemplace por otros que se ajusten a las condiciones requeridas en los Pliegos o, a falta de estos, a las órdenes del Ingeniero Director.

Artículo 12.-

MEDIOS AUXILIARES

Es obligación de la Contrata el ejecutar cuanto sea necesario para la buena construcción y aspecto de las obras aún cuando no se halle expresamente estipulado en los Pliegos de Condiciones, siempre que, sin separarse de su espíritu y recta interpretación, lo disponga el Ingeniero Director y dentro de los límites de posibilidad que los presupuestos determinen para cada unidad de obra y tipo de ejecución.

Serán de cuenta y riesgo del Contratista, los andamios, cimbras, máquinas y demás medios auxiliares que para la debida marcha y ejecución de los trabajos se necesiten, no

cabiendo por tanto, al Propietario responsabilidad alguna por cualquier avería o accidente personal que pueda ocurrir en las obras por insuficiencia de dichos medios auxiliares.

Serán asimismo de cuenta del Contratista, los medios auxiliares de protección y señalización de la obra, tales como vallado, elementos de protección provisionales, señales de tráfico adecuadas, señales luminosas nocturnas, etc. y todas las necesarias para evitar accidentes previsibles en función del estado de la obra y de acuerdo con la legislación vigente.

9.3.3. RECEPCIÓN Y LIQUIDACIÓN.

Artículo 13.-

RECEPCIONES PROVISIONALES

Para proceder a la recepción provisional de las obras será necesaria la asistencia del Propietario, del Ingeniero Director de la Obra y del Contratista o su representante debidamente autorizado.

Si las obras se encuentran en buen estado y han sido ejecutadas con arreglo a las condiciones establecidas, se darán por percibidas provisionalmente comenzando a correr en dicha fecha el plazo de garantía, que se considerará de tres meses.

Cuando las obras no se hallen en estado de ser recibidas se hará constar en el acta y se especificarán en la misma las precisas y detalladas instrucciones que el Ingeniero Director debe señalar al Contratista para remediar los defectos observados, fijándose un plazo para subsanarlos, expirado el cual, se efectuará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones, a fin de proceder a la recepción provisional de la obra.

Después de realizar un escrupuloso reconocimiento y si la obra estuviese conforme con las condiciones de este Pliego, se levantará un acta por duplicado, a la que acompañaran los documentos justificantes de la liquidación final. Una de las actas quedará en poder de la propiedad y la otra se entregará al Contratista.

Artículo 14.-

PLAZO DE GARANTÍA

Desde la fecha en que la recepción provisional quede hecha, comienza a contarse el plazo de garantía que será de un año. Durante este periodo, el Contratista se hará cargo de todas aquellas reparaciones de desperfectos imputables a defectos y vicios ocultos.

Artículo 15.-

CONSERVACIÓN DE LOS TRABAJOS RECIBIDOS PROVISIONALMENTE

Si el Contratista, siendo su obligación no atiende a la conservación de la obra durante el plazo de garantía, en el caso de que el edificio no haya sido ocupado por el Propietario, procederá a disponer todo lo que se precise para que se atienda a la guardería, limpieza y todo lo que fuere menester para su buena conservación, abonándose todo aquello por cuenta de la contrata.

Al abandonar el Contratista el edificio, tanto por buena terminación de las obras, como en el caso de rescisión de contrato, está obligado a dejarlo desocupado y limpio en el plazo que el Ingeniero Director fije.

Después de la recepción provisional del edificio y en el caso de que la conservación del mismo corra a cargo del Contratista, no deberá haber en él más herramientas, útiles, materiales, muebles, etc., que los indispensables para su guardería y limpieza y para los trabajos que fuere preciso realizar.

En todo caso, ocupado o no el edificio, está obligado el Contratista a revisar y repasar la obra durante el plazo expresado, procediendo en la forma prevista en el presente "Pliego de Condiciones Económicas".

El Contratista se obliga a destinar a su costa a un vigilante de las obras que prestará su servicio de acuerdo con las órdenes recibidas de la Dirección Facultativa.

Artículo 16.-

RECEPCIÓN DEFINITIVA

Terminado el plazo de garantía, se verificará la recepción definitiva con las mismas condiciones que la provisional, y si las obras están bien conservadas y en perfectas condiciones, el Contratista quedará relevado de toda responsabilidad económica; en caso contrario se retrasará la recepción definitiva hasta que, a juicio del Ingeniero Director de la Obra, y dentro del plazo que se marque, queden las obras del modo y forma que se determinan en este Pliego.

Si el nuevo reconocimiento resultase que el Contratista no hubiese cumplido, se declarará rescindida la contrata con pérdidas de la fianza, a no ser que la propiedad crea conveniente conceder un nuevo plazo.

Artículo 17.-

LIQUIDACIÓN FINAL

Terminadas las obras, se procederá a la liquidación fijada, que incluirá el importe de las unidades de obra realizadas y las que constituyen modificaciones del Proyecto, siempre y cuando hayan sido previamente aprobadas por la Dirección Técnica con sus precios. De ninguna manera tendrá derecho el Contratista a formular reclamaciones por aumentos de obra que no estuviesen autorizados por escrito a la Entidad propietaria con el visto bueno del Ingeniero Director.

Artículo 18.-

LIQUIDACIÓN EN CASO DE RESCISIÓN

En este caso, la liquidación se hará mediante un contrato liquidatorio, que se redactará de acuerdo por ambas partes. Incluirá el importe de las unidades de obra realizadas hasta la fecha de la rescisión.

9.3.4. FACULTADES DE LA DIRECCIÓN DE OBRAS.

Artículo 19.-

FACULTADES DE LA DIRECCIÓN DE OBRAS

Además de todas las facultades particulares, que corresponden al Ingeniero Director, expresadas en los artículos precedentes, es misión específica suya la dirección y vigilancia de los trabajos que en las obras se realicen bien por si o por medio de sus representantes técnicos y ello con autoridad técnica legal, completa e indiscutible, incluso en todo lo no previsto específicamente en el "Pliego General de Condiciones Varias de la Edificación", sobre las personas y cosas situadas en la obra y en relación con los trabajos que para la ejecución de los edificios y obras anejas se lleven a cabo, pudiendo incluso, pero con causa justificada, recusar al Contratista, si considera que el adoptar esta resolución es útil y necesaria para la debida marcha de la obra.

9.4. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA

9.4.1. BASE FUNDAMENTAL.

Artículo 1.-

BASE FUNDAMENTAL

Como base fundamental de estas "Condiciones Generales de Índole Económica", se establece el principio de que el Contratista debe percibir el importe de todos los trabajos ejecutados, siempre que estos se hayan realizado con arreglo y sujeción al Proyecto y Condiciones Generales y particulares que rijan la construcción del edificio y obra aneja contratada.

9.4.2. GARANTÍAS DE CUMPLIMIENTO Y FIANZAS

Artículo.2.-

GARANTÍAS

El Ingeniero Director podrá exigir al Contratista la presentación de referencias bancarias o de otras entidades o personas, al objeto de cerciorarse de si este reúne todas las condiciones requeridas para el exacto cumplimiento del Contrato; dichas referencias, si le son pedidas, las presentará el Contratista antes de la firma del Contrato.

Artículo 3.-

FIANZAS

Se podrá exigir al Contratista, para que responda del cumplimiento de lo contratado, una fianza del 10% del presupuesto de las obras adjudicadas.

Artículo 4.-

EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS CON CARGO A LA FIANZA

Si el Contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para utilizar la obra en las condiciones contratadas, el Ingeniero Director, en nombre y representación del Propietario, los ordenará ejecutar a un tercero, o directamente por administración, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones legales a que tenga

derecho el propietario en el caso de que el importe de la fianza no baste para abonar el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fueran de recibo.

Artículo 5.-

DEVOLUCIÓN DE LA FIANZA

La fianza depositada será devuelta al Contratista en un plazo que no excederá de 8 días, una vez firmada el acta de recepción definitiva de la obra, siempre que el Contratista haya acreditado, por medio de certificado del Alcalde del Distrito Municipal en cuyo término se halla emplazada la obra contratada, que no existe reclamación alguna contra él por los daños y perjuicios que sean de su cuenta o por deudas de los jornales o materiales, ni por indemnizaciones derivadas de accidentes ocurridos en el trabajo.

9.4.3. PRECIOS Y REVISIONES.

Artículo 6.-

PRECIOS CONTRADICTORIOS

Si ocurriese algún caso por virtud del cual fuese necesario fijar un nuevo precio, se procederá a estudiarlo y convenirlo contradictoriamente de la siguiente forma:

El Adjudicatario formulará por escrito, bajo su firma, el precio que, a su juicio, debe aplicarse a la nueva unidad.

La Dirección técnica estudiará el que, según su criterio, deba utilizarse.

Si ambos son coincidentes se formulará por la Dirección Técnica el Acta de Avenencia, igual que si cualquier pequeña diferencia o error fuesen salvados por simple exposición y convicción de una de las partes, quedando así formalizado el precio contradictorio.

Si no fuera posible conciliar por simple discusión los resultados, el Sr. Director propondrá a la propiedad que adopte la resolución que estime conveniente, que podrá ser aprobatoria del precio exigido por el Adjudicatario o, en otro caso, la segregación de la obra o instalación nueva, para ser ejecutada por administración o por otro adjudicatario distinto.

La fijación del precio contradictorio habrá de proceder necesariamente al comienzo de la nueva unidad, puesto que, si por cualquier motivo ya se hubiese comenzado, el Adjudicatario estará obligado a aceptar el que buenamente quiera fijarse el Sr. Director y a concluir a satisfacción de este.

Artículo 7.-

RECLAMACIONES DE AUMENTO DE PRECIOS

Si el Contratista, antes de la firma del contrato, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error y omisión, reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirve de base para la ejecución de las obras.

Tampoco se le admitirá reclamación de ninguna especie fundada en las indicaciones que, sobre las obras, se hagan en la Memoria, por no servir este documento de base a la Contrata. Las equivocaciones materiales o errores aritméticos en las unidades de obra o en su importe, se corregirán en cualquier época que se observen, pero no se tendrán en cuenta a los efectos de la rescisión de contrato, señalados en los documentos relativos a las "Condiciones Generales o Particulares de Índole Facultativa", sino en el caso de que el Ingeniero Director o el Contratista los hubieran hecho notar dentro del plazo de cuatro meses contados desde la fecha de adjudicación. Las equivocaciones materiales no alterarán la baja proporcional hecha en la Contrata, respecto del importe del presupuesto que ha de servir de base a la misma, pues esta baja se fijará siempre por la relación entre las cifras de dicho presupuesto, antes de las correcciones y la cantidad ofrecida.

Artículo 8.-

REVISIÓN DE PRECIOS

Contratándose las obras a riesgo y ventura, es natural por ello, que no se debe admitir la revisión de los precios contratados. No obstante y dada la variabilidad continua de los precios de los jornales y sus cargas sociales, así como la de los materiales y transportes, que es característica de determinadas épocas anormales, se admite, durante ellas, la revisión de los precios contratados, bien en alza o en baja y en anomalía con las oscilaciones de los precios en el mercado.

Por ello y en los casos de revisión en alza, el Contratista puede solicitarla del Propietario, en cuanto se produzca cualquier alteración de precio, que repercuta, aumentando los contratos. Ambas partes convendrán el nuevo precio unitario antes de comenzar o de continuar la ejecución de la unidad de obra en que intervenga el elemento cuyo precio en el mercado, y por causa justificada, especificándose y acordándose, también, previamente, la fecha a partir de la cual se aplicará el precio revisado y elevado, para lo cual se tendrá en cuenta y cuando así proceda, el acopio de materiales de obra, en el caso de que estuviesen total o parcialmente abonados por el propietario.

Si el propietario o el Ingeniero Director, en su representación, no estuviese conforme con los nuevos precios de los materiales, transportes, etc., que el Contratista desee recibir como normales en el mercado, aquel tiene la facultad de proponer al Contratista, y éste la obligación de aceptarlos, los materiales, transportes, etc..., a precios inferiores a los pedidos por el Contratista, en cuyo caso lógico y natural, se tendrán en cuenta para la revisión, los precios de los materiales, transportes, etc. adquiridos por el Contratista merced a la información del propietario.

Cuando el propietario o el Ingeniero Director, en su representación, no estuviese conforme con los nuevos precios de los materiales, transportes, etc. concertará entre las dos partes la baja a realizar en los precios unitarios vigentes en la obra, en equidad por la experimentada por cualquiera de los elementos constitutivos de la unidad de obra y la fecha en que empezarán a regir los precios revisados.

Cuando, entre los documentos aprobados por ambas partes, figurase el relativo a los precios unitarios contratados descompuestos, se seguirá un procedimiento similar al preceptuado en los casos de revisión por alza de precios.

Artículo 9.-

ELEMENTOS COMPRENDIDOS EN EL PRESUPUESTO

Al fijar los precios de las diferentes unidades de obra en el presupuesto, se ha tenido en cuenta el importe de andamios, vallas, elevación y transporte del material, es decir, todos los correspondientes a medios auxiliares de la construcción, así como toda suerte de indemnizaciones, impuestos, multas o pagos que tengan que hacerse por cualquier concepto, con los que se hallen gravados o se graven los materiales o las obras por el Estado, Provincia o Municipio.

Por esta razón no se abonará al Contratista cantidad alguna por dichos conceptos.

En el precio de cada unidad también van comprendidos los materiales accesorios y operaciones necesarias para dejar la obra completamente terminada y en disposición de recibirse.

9.4.4. VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS

Artículo 10.-

VALORACIÓN DE LA OBRA

La medición de la obra concluida se hará por el tipo de unidad fijada en el correspondiente presupuesto.

La valoración deberá obtenerse aplicando a las diversas unidades de obra. el precio que tuviese asignado en el Presupuesto, añadiendo a este importe el de los tantos por ciento que correspondan al beneficio industrial y descontando el tanto por ciento que corresponda a la baja en la subasta hecha por el Contratista.

Artículo 11.-

MEDICIONES PARCIALES Y FINALES

Las mediciones parciales se verificarán en presencia del Contratista, de cuyo acto se levantará acta por duplicado, que será firmada por ambas partes. La medición final se hará después de terminadas las obras con precisa asistencia del Contratista.

En el acta que se extienda, de haberse verificado la medición en los documentos que le acompañan, deberá aparecer la conformidad del Contratista o de su representación legal. En caso de no haber conformidad lo expondrá sumariamente y a reserva de ampliar las razones que a ello obliga.

Artículo 12.-

EQUIVOCACIONES EN EL PRESUPUESTO

Se supone que el Contratista ha hecho detenido estudio de los documentos que componen el Proyecto, y por tanto al no haber hecho ninguna observación sobre posible errores o equivocaciones en el mismo, se entiende que no hay lugar a disposición alguna en cuanto afecta a medidas o precios de tal suerte, que la obra ejecutada con arreglo al Proyecto contiene mayor número de unidades de las previstas, no tiene derecho a reclamación alguna. Si por el contrario, el número de unidades fuera inferior, se descontará del presupuesto.

Artículo 13.-

VALORACIÓN DE OBRAS INCOMPLETAS

Cuando por consecuencia de rescisión u otras causas fuera preciso valorar las obras incompletas, se aplicarán los precios del presupuesto, sin que pueda pretenderse hacer la valoración de la unidad de obra fraccionándola en forma distinta a la establecida en los cuadros de descomposición de precios.

Artículo 14.-

CARÁCTER PROVISIONAL DE LAS LIQUIDACIONES PARCIALES

Las liquidaciones parciales tienen carácter de documentos provisionales a buena cuenta, sujetos a certificaciones y variaciones que resulten de la liquidación final. No suponiendo tampoco dichas certificaciones aprobación ni recepción de las obras que comprenden la propiedad se reserva en todo momento y especialmente al hacer efectivas las liquidaciones parciales, el derecho de comprobar que el Contratista ha cumplido los compromisos referentes al pago de jornales y materiales invertidos en la Obra, a cuyo efecto deberá presentar el contratista los comprobantes que se exijan.

Artículo 15.-

PAGOS

Los pagos se efectuarán por el Propietario en los plazos previamente establecidos y su importe corresponderá, precisamente, al de las Certificaciones de obra expedidos por el Ingeniero Director, en virtud de las cuales se verifican aquellos.

Artículo 16.-

SUSPENSIÓN POR RETRASO DE PAGOS

En ningún caso podrá el Contratista, alegando retraso en los pagos, suspender trabajos ni ejecutarlos a menor ritmo del que les corresponda, con arreglo al plazo en que deben terminarse.

Artículo 17.-

INDEMNIZACIÓN POR RETRASO DE LOS TRABAJOS

El importe de la indemnización que debe abonar el Contratista por causas de retraso no justificado, en el plazo de terminación de las obras contratadas, será: el importe de la suma de perjuicios materiales causados por imposibilidad de ocupación del inmueble, debidamente justificados.

Artículo 18.-

INDEMNIZACIÓN POR DAÑOS DE CAUSA MAYOR AL CONTRATISTA

El Contratista no tendrá derecho a indemnización por causas de pérdidas, averías o perjuicio ocasionados en las obras, sino en los casos de fuerza mayor. Para los efectos de este artículo, se considerarán como tales casos únicamente los que siguen:

1.- Los incendios causados por electricidad atmosférica.

2.- Los daños producidos por terremotos y maremotos.

3.- Los producidos por vientos huracanados, mareas y crecidas de ríos superiores a las que sean de prever en el país, y siempre que exista constancia inequívoca de que el Contratista tomó las medidas posibles, dentro de sus medios, para evitar o atenuar los daños.

4.- Los que provengan de movimientos del terreno en que estén construidas las obras

5.- Los destrozos ocasionados violentamente, a mano armada, en tiempo de guerra, movimientos sediciosos populares o robos tumultuosos.

La indemnización se referirá, exclusivamente, al abono de las unidades de obra ya ejecutadas o materiales acopiados a pie de obra; en ningún caso comprenderá medios auxiliares, maquinaria o instalaciones, etc., propiedad de la Contrata.

9.4.5. VARIOS.

Artículo 19.-

MEJORAS DE OBRAS

No se admitirán mejoras de obra, más que en el caso en que el Ingeniero Director haya ordenado por escrito la ejecución de los trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados, así como la de los materiales y aparatos previstos en el Contrato. Tampoco se admitirán aumentos de obra en las unidades contratadas, salvo caso de error en las mediciones del Proyecto, a menos que el Ingeniero Director ordene, también por escrito, la ampliación de las contratadas.

Artículo 20.-

SEGURO DE LOS TRABAJOS

El Contratista está obligado a asegurar la obra contratada, durante todo el tiempo que dure su ejecución, hasta la recepción definitiva; la cuantía del seguro coincidirá, en todo momento, con el valor que tengan, por Contrata los objetos asegurados.

El importe abonado por la Sociedad Aseguradora, en caso de siniestro, se ingresará a cuenta, a nombre del propietario, para que, con cargo a ella, se abone la obra que se construya y a medida que ésta se vaya realizando. El reintegro de dicha cantidad al Contratista se efectuará por certificaciones, como el resto de los trabajos de la construcción. En ningún caso, salvo conformidad expresa del Contratista, hecha en documento público, el Propietario podrá disponer de dicho importe para menesteres ajenos a los de la construcción de la parte siniestrada; la infracción de lo anteriormente expuesto será motivo suficiente para que el Contratista pueda rescindir la contrata, con devolución de la fianza, abono completo de gastos, materiales acopiados, etc. y una indemnización equivalente al importe de los daños causados al Contratista por el siniestro y que no le hubiesen abonado, pero solo en proporción equivalente a lo que suponga la indemnización abonada por la Compañía Aseguradora, respecto al importe de los daños causados por el siniestro, que serán tasados a estos efectos por el Ingeniero Director.

En las obras de reforma o reparación se fijará, previamente, la proporción de edificio que se debe asegurar y su cuantía, y si nada se previese, se entenderá que el seguro ha de comprender toda parte de edificio afectado por la obra.

Los riesgos asegurados y las condiciones que figuran en la póliza de seguros, los pondrá el Contratista antes de contratarlos en conocimiento del Propietario, al objeto de recabar de éste su previa conformidad o reparos.

9.5. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL

Artículo 1.-

JURISDICCIÓN

Para cuantas cuestiones, litigios o diferencias pudieran surgir durante o después de los trabajos, las partes se someterán a juicio de amigables componedores nombrados en número igual por ellas y presidido por el Ingeniero Director de la Obra y, en último término, a los Tribunales de Justicia del lugar en que radique la propiedad, con expresa renuncia del fuero domiciliario.

El Contratista es responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el Contrato y en los documentos que componen el Proyecto (la Memoria no tendrá consideración de documento del Proyecto).

El Contratista se obliga a lo establecido en la ley de Contratos de Trabajo y además a lo dispuesto por la de Accidentes de Trabajo, Subsidio Familiar y Seguros Sociales.

Serán de cargo y cuenta del Contratista el vallado y la policía del solar, cuidando de la conservación de sus líneas de lindeo y vigilando que, por los poseedores de las fincas contiguas, si las hubiese, no se realicen durante las obras actos que mermen o modifiquen la propiedad.

Toda observación referente a este punto será puesta inmediatamente en conocimiento del Ingeniero Director.

El Contratista es responsable de toda falta relativa a la política Urbana y a las Ordenanzas Municipales a estos aspectos vigentes en la localidad en que la edificación esté emplazada.

Artículo 2.-

ACCIDENTES DE TRABAJO Y DAÑOS A TERCEROS

En caso de accidentes ocurridos con motivo y en el ejercicio de los trabajos para la ejecución de las obras, el Contratista se atenderá a lo dispuesto a estos respectos, en la legislación vigente, y siendo, en todo caso, único responsable de su cumplimiento y sin que, por ningún concepto, pueda quedar afectada la Propiedad por responsabilidades en cualquier aspecto.

El Contratista está obligado a adoptar todas las medidas de seguridad que las disposiciones vigentes perpetúan para evitar, en lo posible, accidentes a los obreros o viandantes, no sólo en los andamios, sino en todos los lugares peligrosos de la obra.

De los accidentes o perjuicios de todo género que, por no cumplir el Contratista lo legislado sobre la materia, pudieran acaecer o sobrevenir, será éste el único responsable, o sus representantes en la obra, ya que se considera que en los precios contratados están incluidos todos los gastos precisos para cumplimentar debidamente dichas disposiciones legales.

El Contratista será responsable de todos los accidentes que, por inexperiencia o descuido, sobrevinieran tanto en la edificación donde se efectúen las obras como en las contiguas. Será por tanto de su cuenta el abono de las indemnizaciones a quien corresponda y cuando a ello hubiera lugar, de todos los daños y perjuicios que puedan causarse en las operaciones de ejecución de las obras.

El Contratista cumplirá los requisitos que prescriben las disposiciones vigentes sobre la materia, debiendo exhibir, cuando a ello fuera requerido, el justificante de tal cumplimiento.

Artículo 3.-

PAGOS DE ARBITRIOS

El pago de impuestos y arbitrios en general, municipales o de otro origen, sobre vallas, alumbrado, etc., cuyo abono debe hacerse durante el tiempo de ejecución de las obras por concepto inherente a los propios trabajos que se realizan correrá a cargo de la Contrata, siempre que en las condiciones particulares del Proyecto no se estipule lo contrario. No obstante, el Contratista deberá ser reintegrado del importe de todos aquellos conceptos que el Ingeniero Director considere justo hacerlo.

Artículo 4.-

CAUSAS DE RESCISIÓN DEL CONTRATO

Se considerarán causas suficientes de rescisión las que a continuación se señalan:

- 1.- La muerte o incapacidad del Contratista.
- 2.- La quiebra del Contratista.

En los casos anteriores, si los herederos o síndicos ofrecieran llevar a cabo las obras, bajo las mismas condiciones estipuladas en el Contrato, el Propietario puede

admitir o rechazar el ofrecimiento, sin que en este último caso tengan aquellos derecho a indemnización alguna.

3.- Las alteraciones del Contrato por las causas siguientes:

A).- La modificación del Proyecto en forma tal que presente alteraciones fundamentales de mismo, a juicio del Ingeniero Director y, en cualquier caso siempre que la variación del presupuesto de ejecución, como consecuencia de estas modificaciones, represente en más o menos del 40 por 100, como mínimo, de algunas unidades del Proyecto modificadas.

B).- La modificación de unidades de obra, siempre que estas modificaciones representen variaciones en más o menos del 40 por 100, como mínimo de las unidades del Proyecto modificadas.

4.- La suspensión de la obra comenzada y, en todo caso, siempre que, por causas ajenas a la Contrata, no se de comienzo a la obra adjudicada dentro del plazo de tres meses, a partir de la adjudicación, en este caso, la devolución de la fianza será automática.

5.- La suspensión de obra comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido un año.

6.- El no dar comienzo la Contrata a los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones particulares del Proyecto.

7.- El incumplimiento de las condiciones del Contrato, cuando implique descuido o mala fe, con perjuicio de los intereses de la obra.

8.- La terminación del plazo de ejecución de la obra, sin haberse llegado a ésta.

9.- El abandono de la obra sin causa justificada.

10.- La mala fe en la ejecución de los trabajos.

9. CONCLUSIONES

La conclusión del presente proyecto es la viabilidad tanto técnica como económica de una planta para la producción de 250 kg/día de silicio de grado solar siguiendo la tecnología del proceso Siemens, en la que se incluye una unidad para la obtención de 1000 t/año de triclorosilano con una pureza mínima del 99,99 %. Con este proceso se lograría disponer de una fuente independiente de silicio para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos, contribuyendo de esta manera al desarrollo de la industria fotovoltaica así como a generalizar el uso y aplicación de la energía solar.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible obtener silicio con la pureza requerida para la fabricación de células y paneles solares fotovoltaicos, y que éste es más barato que el silicio utilizando actualmente, el silicio de grado semiconductor que es el excedente fuera de especificaciones de la industria microelectrónica.

También es importante destacar que este proceso supondría un abaratamiento del precio final de la energía solar, al abaratar el coste de su materia prima principal. De hecho, se prevé que la reducción del precio del silicio ultrapuro sea un factor cada vez más importante. Por un lado, se estima que el precio del silicio de grado semiconductor suba de forma acusada en los próximos años, dado que el progresivo desarrollo de la industria microelectrónica hará que cada vez tenga menos silicio residual. Por otra parte, la industria fotovoltaica al desarrollarse y expandir su mercado tendrá mayor necesidad de un producto cuya oferta está disminuyendo.

En cualquier caso, siempre es importante reflexionar sobre todo estudio realizado y ver dónde se podría mejorar. En nuestro caso hemos utilizado numerosas aproximaciones y hemos recurrido a ecuaciones empíricas y semiempíricas para llegar a un estudio preliminar, si el proyecto se fuera a llevar a cabo sería importante utilizar métodos más rigurosos y hacer uso de programas de simulación para llegar a resultado más óptimos, aparte de considerar la posibilidad de operar primero en una planta piloto antes de pasar a escala industrial.

10. BIBLIOGRAFÍA

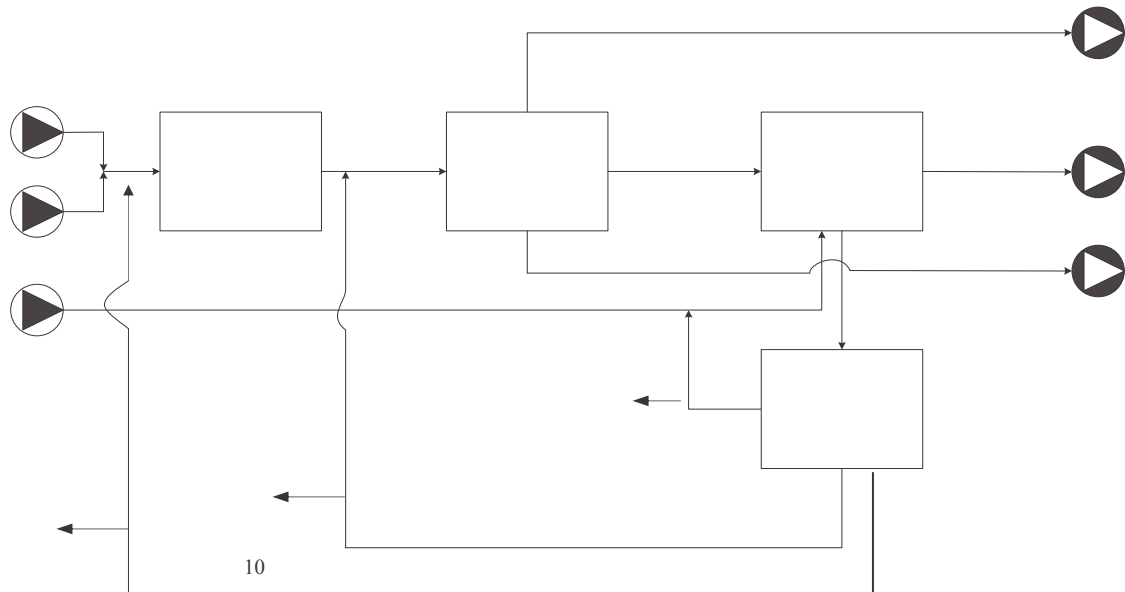
- [1] Hacia una electricidad para todos. Informe ASIF, Octubre 2004.
- [2] PHOTON International, Enero 2005.
- [3] EurObserver 69, Photovoltaic energy barometer-April 2004.
- [4] P.Woditsch, W.Koch. Solar grade silicon feedstock supply for PV industry. Solar Energy Material & Solar Cells. 2002.
- [5] Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. Ed. Ciemat 2002, capítulo 2.
- [6] K. Kambach. Reuse of Silicon, 19 th EUPSEC, June 2004, Paris.
- [7] Aulich and Schulze. Crystalline Silicon Feedstock for Solar Cells. Prog.Photovol. Res. Appl. 2002.
- [8] Luque, A; Hegedus, S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2003 John Wiley & Sons
- [9] PHOTON International, Junio 2004.
- [10] PHOTON International, Noviembre 2004.
- [11] <http://www.pta.es>
- [12] <http://www.isofoton.com>
- [13] <http://www.censolar.es>
- [14] Patente US 2001/0053339 A1 (Degussa AG, 2001).
- [15] Patente US 4676967 (Union Carbide Co., 1982).
- [16] Patente US 2004/0062702 (2001).
- [17] Patente JP 2002362917 (Sumitomo Titanium Corp., 2002).
- [18] Patente JP 2000319095 (Komatsu Denshi Kinzoku KK, 2000).
- [19] Patente EP 0213215 (Denki Kagaku Kogyo KK, 1987).
- [20] Patente US 4676967 (Union Carbide Corp., 1982).
- [21] Patente US 2004047797 (2004).
- [22] Patente GB 1019653 (Union Carbide Corp., 1966).
- [23] Patente US 3414603 (Tyco Laboratories Inc., 1968).
- [24] Patente US 4224040 (Smiel Spa, 1980).
- [25] Patente GB 925143 (Wacker Chemie GmbH, 1963).
- [26] Patente US 3540861 (Union Carbide Corp., 1970).
- [27] Reid, Prausnitz and Poling. The properties of gases and liquids. 4ª Edición.
- [28] Coulson and Richardson .Chemical engineering, vol 6. 3ª Edición. 2001.

- [29] McCabe,W.L.; Smith, J.C.; Harriott, P. Operaciones unitarias en ingeniería química. Ed. McGraww-Hill. 6ª Edición. 2002.
- [30] Ollero de Castro, P.; Fernández Camacho, E. Control e instrumentación de procesos químicos. Ed. Síntesis. 2001.
- [31] Vian Ortuño, A. El pronóstico económico en química industrial. Ed. EUEDEMA. 1991.
- [32] Mañas Lahoz. Seguridad Básica en la Industria Química y Petrolera. Ed. Asepeyo.
- [33] Kolcuru, R. y Bartell, S. Risk assessment and management Handbook. McGraw-Hill. 1996.
- [34] Santamaría, R. Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química. Fundación Mapfre.1994
- [35] Ernest E. Ludwig. Applied process design for chemical and petrochemical plants, Vol. 3. Gulf Publishing Company. 3ª Edición. 1983.
- [36] Seader. J.D., Henley, E.J. Separation Process Principles. Ed. John Wiley & SONS.1998.
- [37] Alain Ricaud. Silicon requirements for the PV industry 2003-2010. CYTHELIA Consultants. 2005
- [38] Kato,K., Murata, A. and Sakuta, K. Energy payback time and life cycle CO₂ emission of residential PV power system with silicon PV module, Progress in Photovoltaics Research Applications Vol 6. 1998

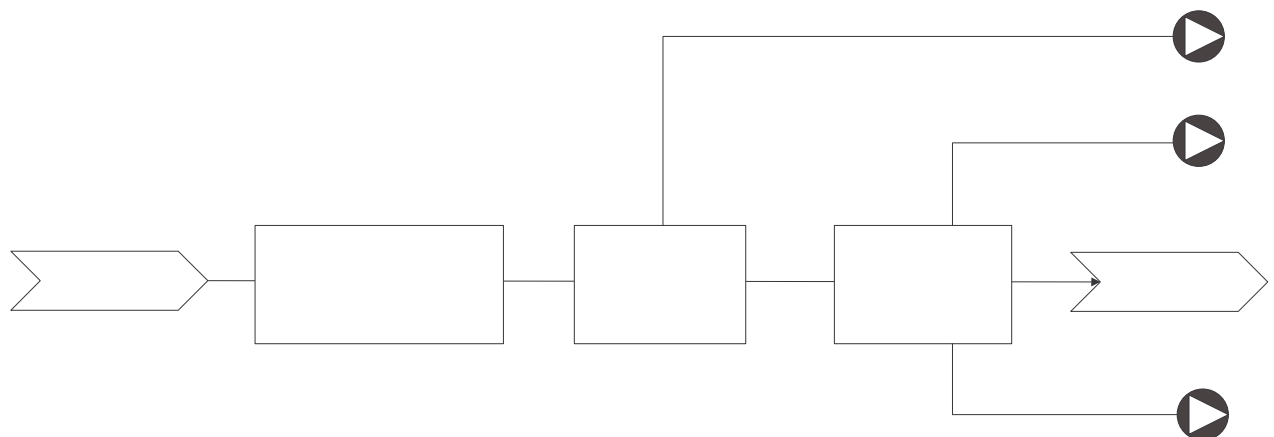
11. ANEXOS

ANEXO 1: Diagramas

1. Diagrama de bloques general

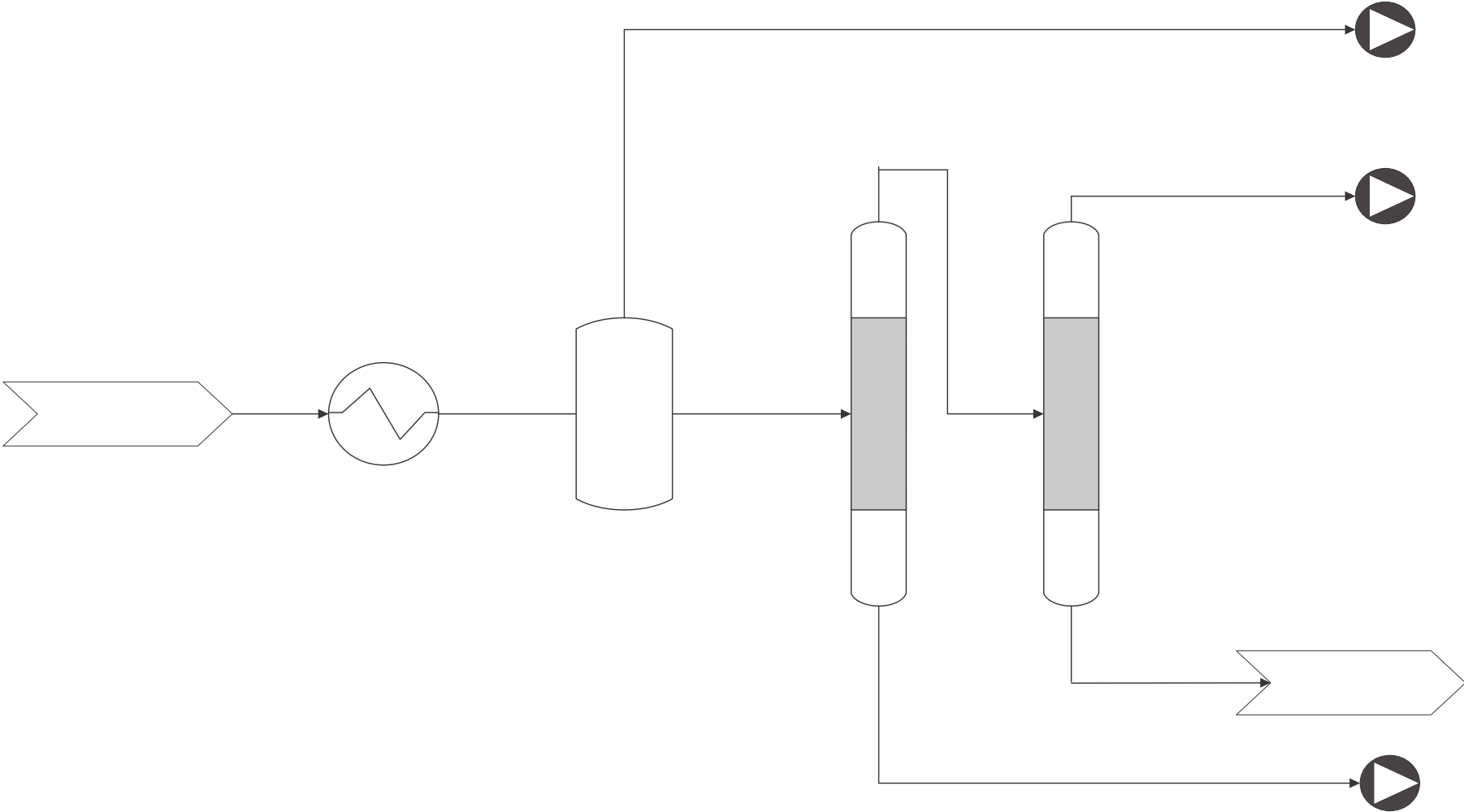


2. Diagrama de bloques de la sección objeto de estudio

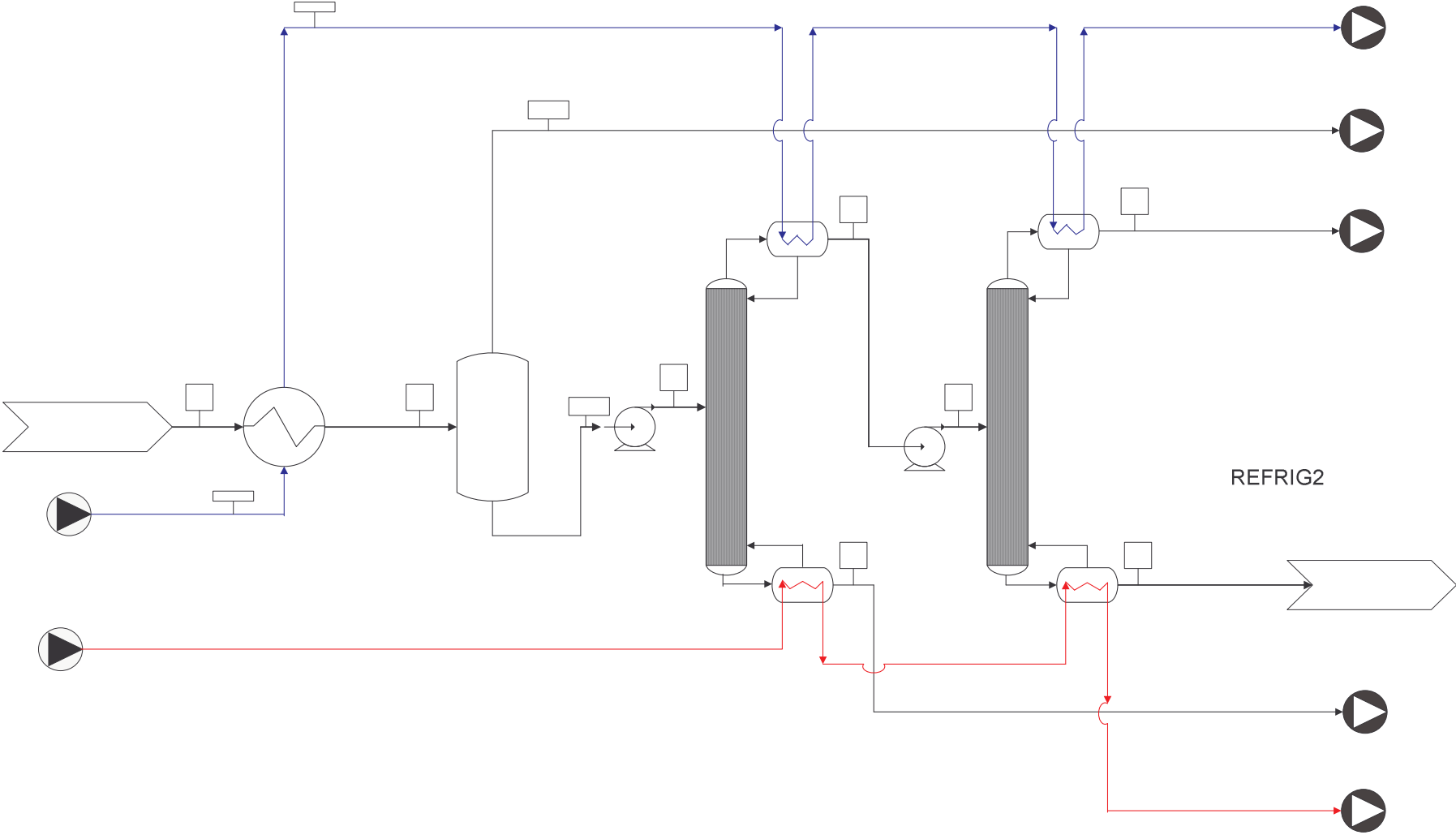


Si-MG

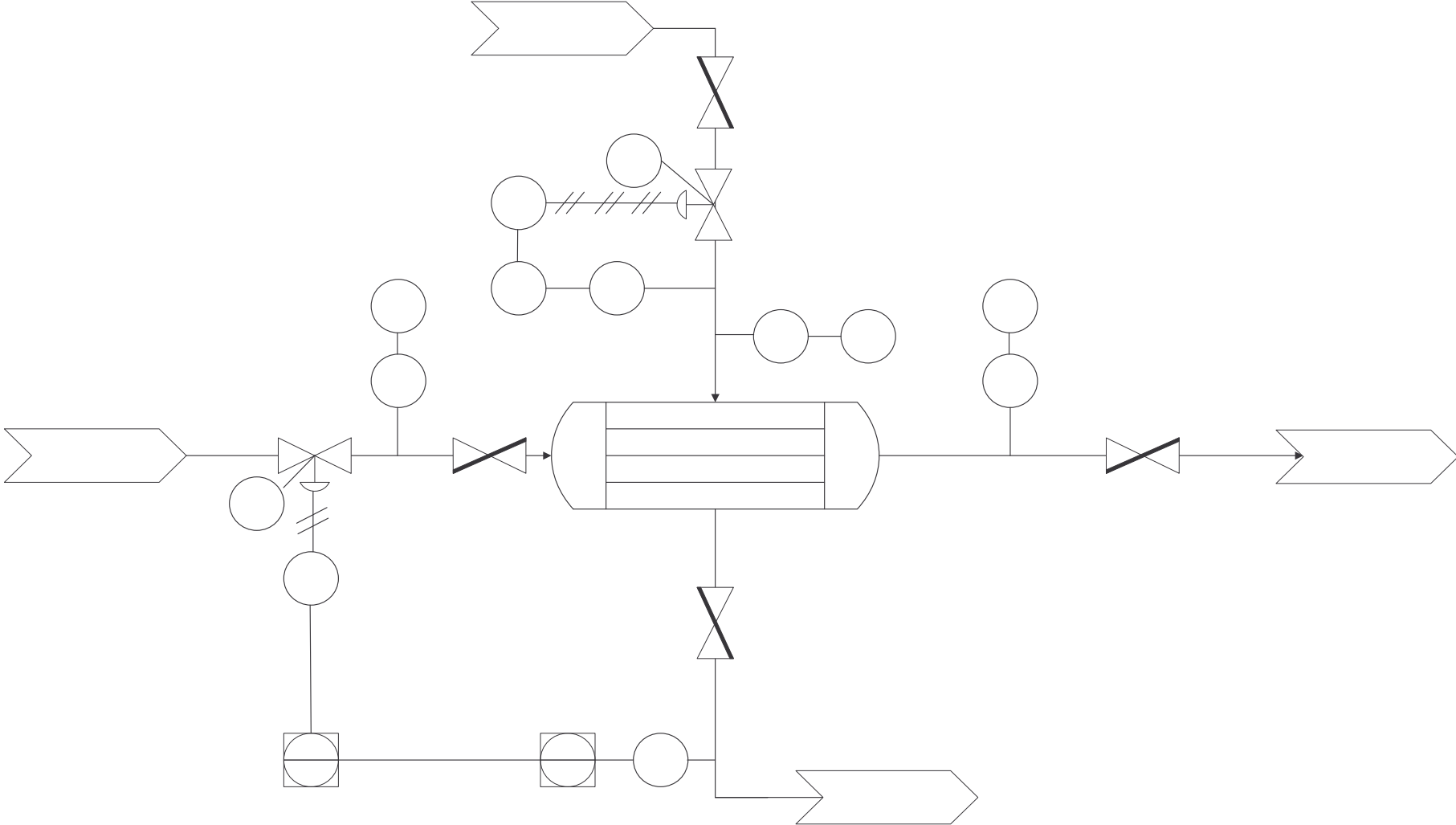
3. Diagrama de flujo



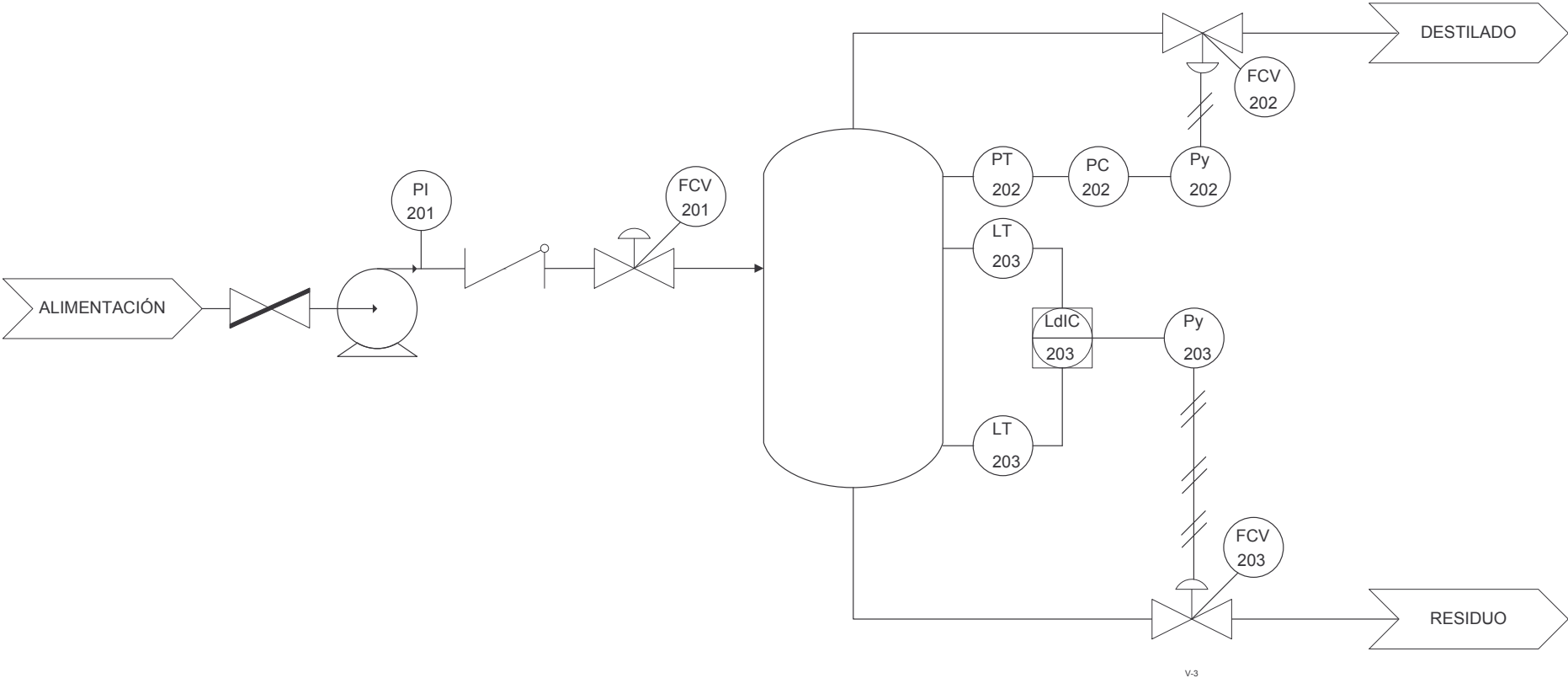
4. Diagrama de flujo con servicios



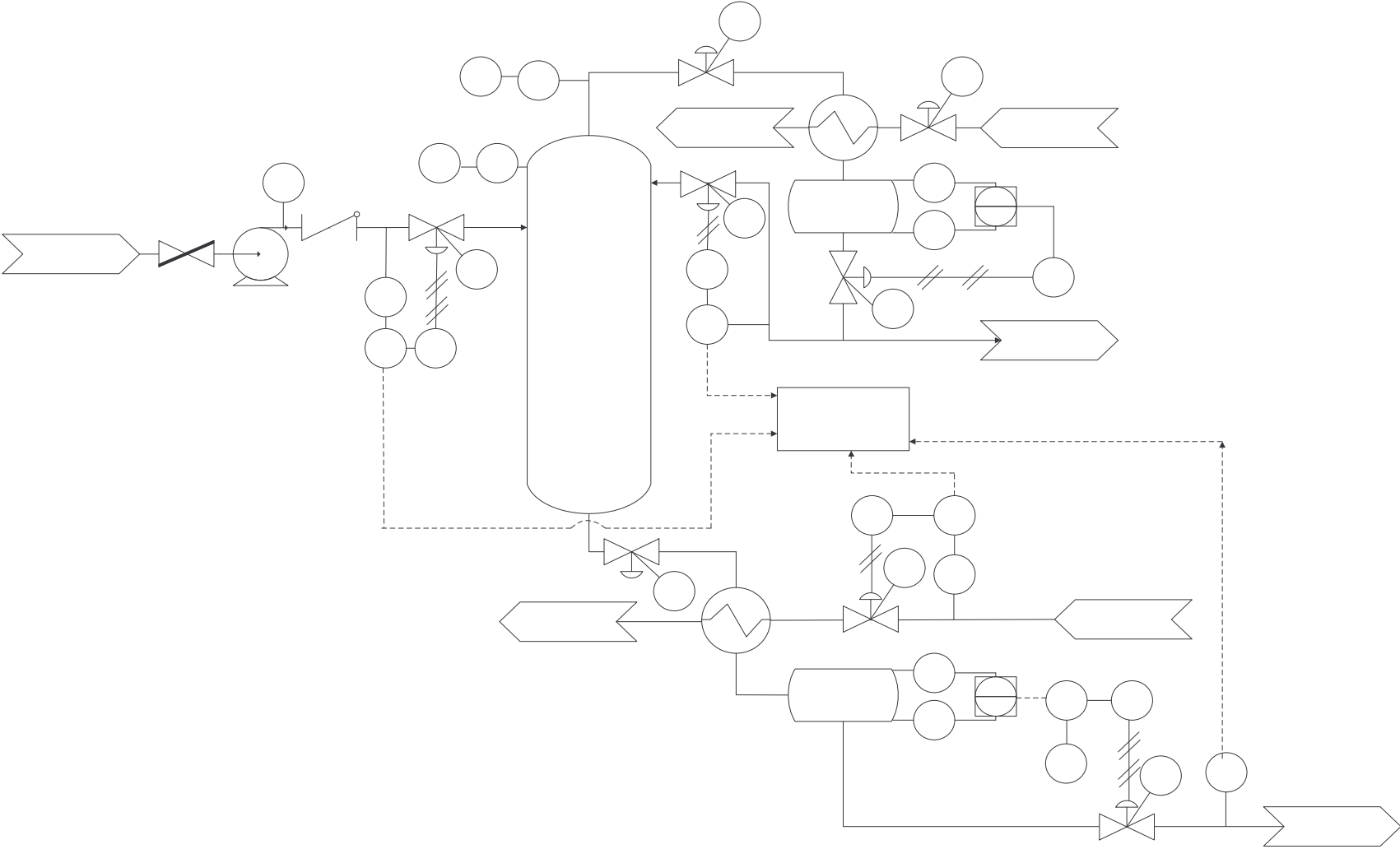
5. P&ID E-110



6. P&ID D-210



7. P&ID D-310 y D-320



PI
301

ANEXO 2: Ecuación de Antoine extendida

$$\ln P_i^s = C_1 + \frac{C_2}{T + C_3} + C_4 T + C_5 \ln(T) + C_6 T^{C_7} \quad [2.1]$$

Unidades: N/m²

[Ecuación válida en el intervalo de temperatura $C_8 \leq T \leq C_9$]

Tabla 12.1. Parámetros de la ecuación de Antoine extendida.

C	SiCl ₄	SiHCl ₃	SiH ₂ Cl ₂	HCl	AsH ₃	B ₂ H ₆	H ₂	BCl ₃	PCl ₃	PH ₃
1	70,402	42,504	47,27	104,27	50,43	35,141	12,69	90,809	135,46	56,954
2	-5506	-4034	-4034	-3731	-2869	-2271	-94,90	-5453	-7436	-2689
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	7,3965	-3,039	-3,797	-15,05	-4,816	-2,182	1,1125	-10,83	-18,92	-6,047
6	6,3·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻¹⁷	1,4·10 ⁻¹⁷	0,0313	1,1·10 ⁻⁵	4,0·10 ⁻¹⁷	0,0003	1,3·10 ⁻⁵	0,0232	1,9·10 ⁻⁵
7	2	6	6	1	2	6	2	2	1	2
8	204,3	144,95	151,15	158,97	156,23	107,65	13,95	166,15	181,15	139,37
9	507	479	459	324,65	373	289,8	33,19	451,95	563,15	324,75

ANEXO 3: Ecuación cúbica de estado de Peng-Robinson

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2} \quad [3.1]$$

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A + 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad [3.2]$$

Parámetros:

$$a = 0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = 0,07780 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$\alpha^{0,5} = 1 + (0,37464 + 1,54226 w' - 0,26992 w^2)(1 - T_r^{0,5})$$

$$A = 0,45724 \alpha \frac{P_r}{T_r^2}$$

$$B = 0,07780 \frac{P_r}{T_r}$$

Reglas de mezcla:

$$a \alpha = \sum \sum y_i y_j (a \alpha)_{ij}$$

$$b = \sum y_i b_i$$

$$(a \alpha)_{ij} = (1 - k_{ij}) [(a \alpha)_i (a \alpha)_j]^{0,5}$$

$$A = \sum \sum y_i y_j A_{ij}$$

$$B = \sum y_i B_i$$

$$A_{ij} = (1 - k_{ij}) (A_i A_j)^{0,5}$$

ANEXO 4: Ecuación de la capacidad calorífica de un gas

$$C_p^{i,g} = C_{1i} + C_{2i} \left(\frac{\frac{C_{3i}}{T}}{\sinh\left(\frac{C_{3i}}{T}\right)} \right)^2 + C_{4i} \left(\frac{\frac{C_{5i}}{T}}{\cosh\left(\frac{C_{5i}}{T}\right)} \right)^2 \quad [4.1]$$

Unidades: J/(kmol K)

[Ecuación válida en el intervalo de temperatura $C_6 \leq T \leq C_7$]

Tabla 12.2. Parámetros de la ecuación utilizada en el cálculo de la capacidad calorífica de un gas.

C	SiCl ₄	SiHCl ₃	SiH ₂ Cl ₂	HCl	AsH ₃	B ₂ H ₆	H ₂	BCl ₃	PCl ₃	PH ₃
1	45200	45478	38132	29157	33250	35610	27617	34479	42110	33266
2	62887	61378	68536	9048	34140	147120	9560	48356	41050	49816
3	427,6	887,9	1084,4	2093,8	1140	1440	2466	554,13	569,2	1605,3
4	40191	56362	55320	-107	19150	86140	3760	30525	38720	24764
5	202,32	389,03	465,88	120	663	635	567,6	237,6	282,9	771
6	100	100	100	50	80	100	250	100	100	100
7	1500	1500	1500	1500	1500	6000	1500	1500	1500	1500

ANEXO 5: Correlación de Rowlinson-Bondi para la capacidad calorífica de un líquido

$$\frac{C_{pL} - C_p^o}{R} = 1,45 + \frac{0,45}{1 - T_r} + 0,25 \omega \left[17,11 + \frac{25,2(1 - T_r)^{1/3}}{T_r} + \frac{1,742}{1 - T_r} \right] \quad [5.1]$$

Unidades: J/(mol K)

donde:

$$T_{ri} = \frac{T}{T_{ci}}$$

C_p^o : capacidad calorífica de la mezcla líquida bajo condiciones estándar (0 °C y 1 atm)

ANEXO 6: Ecuación del calor latente de vaporización

$$\Delta_{vap} H_i^v = C_{li} (1 - T_{ri})^{(C_2 + C_3 T_{ri} + C_4 T_{ri}^2 + C_5 T_{ri}^3)} \quad [6.1]$$

Unidades: J/kmol

[Ecuación válida en el intervalo de temperatura $C_6 \leq T \leq C_7$]

Tabla 12.3. Parámetros de la ecuación utilizada en el cálculo del calor latente de vaporización.

C	SiCl ₄	SiHCl ₃	SiH ₂ Cl ₂	HCl	AsH ₃	B ₂ H ₆	H ₂	BCl ₃	PCl ₃	PH ₃
1	416·10 ⁵	389·10 ⁵	368·10 ⁵	221·10 ⁵	222·10 ⁵	208·10 ⁵	10·10 ⁵	372·10 ⁵	442·10 ⁵	193·10 ⁵
2	0,3795	0,3817	0,4022	0,3466	0,3559	0,3828	0,698	0,4479	0,4229	0,3332
3	0	0	0	0	0	0	-1,817	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1,447	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	204,3	144,95	151,15	158,97	156,23	107,65	13,95	166,15	181,15	139,37
7	507	479	459	324,65	373	289,8	33,19	451,95	563,15	324,75

ANEXO 7: Ecuación de la viscosidad de un líquido

$$\ln(\eta_i^l) = C_{1i} + \frac{C_{2i}}{T} + C_{3i} \ln(T) + C_{4i} T^{C_{5i}} \quad [7.1]$$

Unidades: N s/m²

[Ecuación válida en el intervalo de temperatura $C_6 \leq T \leq C_7$]

Tabla 12.4. Parámetros de la ecuación utilizada en el cálculo de la viscosidad de un líquido.

C	SiCl ₄	SiHCl ₃	SiH ₂ Cl ₂	HCl	AsH ₃	B ₂ H ₆	H ₂	BCl ₃	PCl ₃	PH ₃
1	16,8	-10,651	-78,487	71,32	-12,15	0,389	-11,661	-13,628	-16,796	19,153
2	-455	782	1850,3	-2542,1	812,4	139,98	24,7	680,27	1013,2	-295,21
3	-4,032	0	12,75	-12,68	0	-1,941	-0,261	0,56386	1,026	-4,9919
4	0	0	-0,0293	0	0	-4,1·10 ⁻¹⁶	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	258,15	265,65	151,15	233,15	165	107,65	13,95	166,15	200	148,15
7	354,05	333,65	413,15	313,15	210,6 7	180,65	33	285,65	349,25	223,15

ANEXO 8: Ecuación de la tensión superficial de un líquido

$$\sigma_i^l = C_{li} (1 - T_{ri})^{(C_{2i} + C_{3i}T_{ri} + C_{4i}T_{ri}^2 + C_{5i}T_{ri}^3)} \quad [8.1]$$

Unidades: N/m

[Ecuación válida en el intervalo de temperatura $C_6 \leq T \leq C_7$]

Tabla 12.5. Parámetros de la ecuación utilizada en el cálculo de la tensión superficial de un líquido.

C	SiHCl ₃	SiCl ₄	SiH ₂ Cl ₂	HCl	AsH ₃	B ₂ H ₆	H ₂	BCl ₃	PCl ₃	PH ₃
1	0.0516	0.054	0.056	0.0852	0.0669	0.0433	0.0053	0.0568	0.071	0.050
2	1.140	1.159	1.281	1.297	1.301	1.152	1.065	1.147	1.225	1.027
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	204.3	144.95	151.15	158.97	156.23	107.65	13.95	166.15	181.15	139.37
7	507	479	459	324.65	373	289.8	33.19	451.95	563.15	324.75

ANEXO 9: Cálculo de algunos parámetros de equipo

9.1 Superficie de intercambio del condensador parcial E-110

El área requerida para la transmisión de calor en el condensador parcial, no sólo es necesaria para su diseño y construcción sino también para estimar su coste.

$$A_T = \frac{Q_T}{U \cdot \Delta T_{ml}} \quad [9.1.1.]$$

donde:

Q_T : flujo total de calor (W)

U : coeficiente global de transferencia de calor (W/m²/K)

ΔT_{ml} : diferencia de temperatura media logarítmica (K)

$$\Delta T_{ml}^i = \frac{(T_{\text{entrada refrigerante}} - T_{\text{entrada corriente}}) - (T_{\text{salida refrigerante}} - T_{\text{salida corriente}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{entrada refrigerante}} - T_{\text{entrada corriente}}}{T_{\text{salida refrigerante}} - T_{\text{salida corriente}}} \right)} \quad [9.1.2]$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{Q_T}{\sum \frac{Q_i}{\Delta T_{ml}^i}} \quad [9.1.3]$$

En este caso la ecuación anterior adopta la siguiente expresión:

$$\Delta T_{ml}^{TOTAL} = \frac{Q_T}{\frac{Q_{gas}}{\Delta T_{ml}^{gas}} + \frac{Q_{cond}}{\Delta T_{ml}^{cond}} + \frac{Q_{líq}}{\Delta T_{ml}^{líq}}} \quad [9.1.4]$$

$$\Delta T_{ml}^{TOTAL} = 102,7 \text{ K}$$

Conocido el coeficiente global de transferencia de calor ($U = 35 \text{ W/m}^2/\text{K}$), la diferencia de temperatura media logarítmica ($\Delta T_{ml}^{TOTAL} = 102,7 \text{ K}$) y el flujo total de calor intercambiado ($Q_T = 25373 \text{ W}$), resulta un área de:

$$A \sim 8 \text{ m}^2$$

9.2 Diámetro y longitud del separador gas/líquido D-210

El diámetro y la longitud del separador se utilizan en el diseño y construcción de este equipo, así como en la estimación de su coste.

El diámetro se calcula como:

$$D_v = \sqrt{\frac{4Q_v}{\pi \cdot u_s}} \quad [9.2.1]$$

donde:

D_v : diámetro mínimo del recipiente (m)

Q_v : caudal volumétrico del vapor (m^3/s)

u_s : velocidad de sedimentación de las gotas de líquido (m/s)

$$u_s = 0.07 \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} \quad [9.2.2]$$

donde:

ρ_L : densidad de la mezcla líquida (kg/m^3), (Peng–Robinson, anexo 3)

ρ_v : densidad de la mezcla vapor (kg/m^3), (Peng–Robinson, anexo 3)

Si el equipo no dispone de un separador de gotas, como es el caso, el valor de u_s obtenido con la ecuación anterior se corrige multiplicándolo por 0,15.

Se asume que el vapor ocupa una fracción, $f_v=0,5$, de la sección transversal del separador con lo que su velocidad, u_v , se puede calcular como:

$$u_v = \frac{4Q_v}{\pi D_v^2 f_v} \quad [9.2.3]$$

También se considera que la altura del vapor en el separador es $h_v=0,5D_v$, y que la relación longitud total del separador entre diámetro total del separador es $L_v/D_v=3$.

El tiempo de residencia del vapor en el separador, necesario para la correcta separación de las gotas de líquido, es h_v/u_s y su tiempo de residencia real en el separador L_v/u_v .

Para un diseño correcto del separador:

$$h_v / u_s = L_v / u_v \rightarrow 0,5D_v = 3D_v / u_v \rightarrow D_v = \sqrt{\frac{4Q_v}{3 u_s \pi}} \quad [9.2.4]$$

Entonces:

$$D_v = 13 \text{ cm} \quad L_v = 39 \text{ cm}$$

El volumen ocupado por el líquido en el separador es $V_L=0,22 \text{ m}^3$, lo que supone un tiempo de residencia de $t_L=11 \text{ min} > 10 \text{ min}$, suficiente para considerar que sus dimensiones son aceptables.

9.3 Diámetro de las columnas de destilación D-310 y D-320

Para calcular el diámetro son necesarios los siguientes datos de partida:

Tabla 12.6. Datos necesarios para el cálculo del diámetro de las columnas.

	D-310	D-320
F (kmol/día)	35,36	23,80
D (kmol/día)	23,80	3,53
R (kmol/día)	11,57	20,27
q	1,20	1,33
L/D	21	8

Su estimación se realiza para las dos secciones de la columna, la de enriquecimiento y la de agotamiento. El diámetro definitivo será el mayor de los dos valores obtenidos.

Además, se necesitan valores de las siguientes propiedades físicas en ambos sectores: densidad en fase líquida, densidad en fase vapor y tensión superficial del líquido (anexos 3,8).

Tabla 12.7. Propiedades físicas en la sección de enriquecimiento.

	D-310	D-320
T (K)	322,15	322,15
P (MPa)	1,01	1,07
Pm_{medio} (kg/kmol)	123,55	55,23
V_v (m ³ /kmol)	1,70	1,945
ρ_L (kmol/m ³)	10,27	14,74
σ_L (N/m)	0,01	0,003

Tabla 12.8. Propiedades físicas en la sección de agotamiento.

	D-310	D-320
T (K)	427,44	397,54
P (MPa)	1,06	1,12
Pm_{medio} (kg/kmol)	169,24	135,45
V_V (m ³ /kmol)	2,43	2,03
ρ_L (kmol/m ³)	6,81	8,12
σ_L (N/m)	0,01	0,007

A continuación, se describe detalladamente el procedimiento seguido para el cálculo del diámetro en la primera columna (D-310).

Sección de enriquecimiento

Primero se calcula la relación entre los caudales de líquido y de vapor:

$$\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} = 0,95 \frac{\frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\frac{\text{kg}}{\text{s}}} \quad [9.3.1]$$

Con este valor se calcula el factor de flujo líquido-vapor, F_{LV} :

$$F_{LV} = \frac{L}{V} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_L}} = 0,23 \quad [9.3.2]$$

utilizado para determinar el valor de $K_1 = 0,04$ a partir de la gráfica [28] de la figura 12.1, en la que se ha tomado un interespaciado entre platos $l_1 = 0,45$ m.

Esta constante debe ser corregida cuando la tensión superficial del líquido es distinta de 0,02 N/m:

$$K_{1 \text{ corregida}} = K_1 \left(\frac{\sigma}{0,02} \right)^{0,2} = 0,04 \quad [9.3.3]$$

La velocidad de inundación se calcula, entonces, como:

$$u_f = K_{1 \text{ corregida}} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} = 0,15 \text{ m/s} \quad [9.3.4]$$

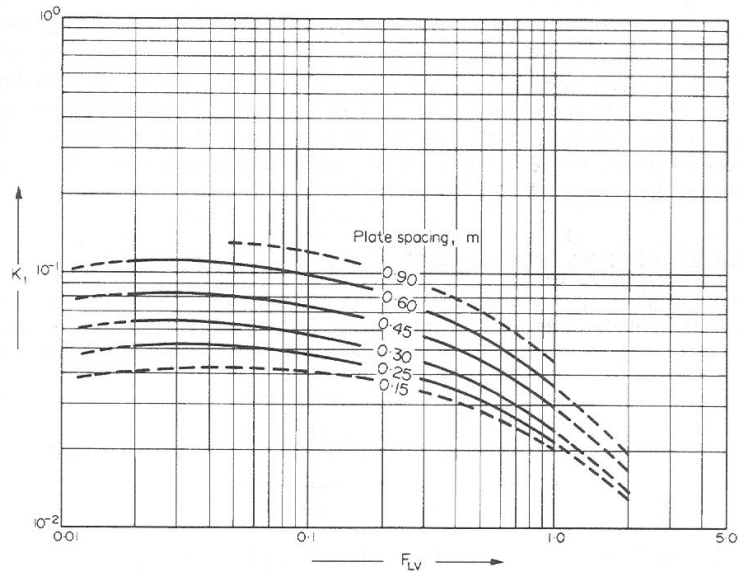


Figura 12.1. Gráfica para el cálculo de K_1 en función de F_{LV} y l_t .

La máxima velocidad superficial permitida para el vapor (u_v) suele oscilar entre el 70 y el 90 % de la velocidad correspondiente a la inundación (u_f). Para propósitos de diseño se recomienda [28] que $u_v = (80-85 \%) u_f$. Tomando $u_v = 0,85 u_f$, resulta:

$$u_v = 0,13 \text{ m/s}$$

El caudal de vapor en la sección de enriquecimiento (V) se define como:

$$V = D(R + 1) = 523,68 \text{ kmol / día} \simeq 0,01 \text{ m}^3 / \text{s} \tag{9.3.5}$$

Conocidos el caudal y la máxima velocidad superficial permitida para el vapor, se puede calcular el área neta de la columna (A_n).

$$A_n = \frac{V}{u_v} = 0,08 \text{ m}^2 \tag{9.3.6}$$

Para calcular el área total (A_c) de la sección transversal de la columna hay que sumar al área neta el área del vertedero, que se puede estimar como el 12 % del área total. Entonces, resulta:

$$A_{c, \text{enriquecimiento}} = 0,09 \text{ m}^2 \qquad D_{c, \text{enriquecimiento}} = 0,40 \text{ m}$$

En la tabla 12.9 se recogen los resultados obtenidos para las secciones de enriquecimiento de ambas columnas.

Tabla 12.9. Resumen de resultados en el sector de enriquecimiento.

	D-310	D-320
L'/V'	0,95	0,891
F_{LV}'	0,23	0,166
K_I'	0,04	0,04
$K_{I, \text{ corregida }}'$	0,037	0,028
u_f' (m/s)	0,15	0,147
u_v' (m/s)	0,13	0,125
V' (kmol/día)	523,68	32,49
$Q_{V'}$ (m ³ /s)	0,01	0,0007
A_n (m ²)	0,08	0,0059
A_c (m ²)	0,09	0,0067
D_c (m)	0,40	0,30

Sector de agotamiento

Se sigue el procedimiento anterior de manera análoga. La única diferencia se encuentra en el cálculo del caudal de vapor y líquido en esta sección:

$$L' = \left(\frac{L}{D} D + qA \right) \quad [9.3.7]$$

$$V' = \left(\frac{L}{D} + 1 \right) D + (q - 1)A \quad [9.3.8]$$

Tabla 12.10. Resumen de resultados en el sector de agotamiento.

	D-310	D-320
L'/V'	1,022	1,504
F_{LV}'	0,251	0,371
K_I'	0,035	0,035
$K_{I, \text{ corregida }}'$	0,028	0,028
u_f' (m/s)	0,110	0,111
u_v' (m/s)	0,093	0,095
V' (kmol/día)	530,91	40,22
$Q_{V'}$ (m ³ /s)	0,010	0,001
A_n (m ²)	0,112	0,010
A_c (m ²)	0,127	0,011
D_c (m)	0,50	0,40

De los valores obtenidos para el diámetro en ambas secciones de cada columna, se elige el mayor de ellos para tener completa certeza de que la operación se va a realizar correctamente.

Tabla 12.11. Diámetro obtenido para las columnas de destilación.

	D-310	D-320
D_c (m)	0,50	0,40

ANEXO 10: Fichas de seguridad

10.1 Hidrógeno

<p>1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA</p> <p>Nombre de producto: hidrógeno Fórmula química: H₂ Identificación de la empresa: PRAXAIR c/Orense, 11 28020 - MADRID</p>	<p>2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES</p> <p>Sustancia o mezcla: Sustancia. Componentes e impurezas: No contiene otros componentes o impurezas que puedan modificar la clasificación del producto.</p>
<p>3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gas comprimido a alta presión. ▪ Extremadamente inflamable. <p>5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS</p> <p>Riesgos específicos: La exposición al fu explosión.</p> <p>Productos peligrosos de la combustión:</p> <p>Medios de extinción adecuados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se pueden utilizar todos los agentes extintores conocidos <p>Medios específicos de actuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Si es posible detener la fuga de producto. ▪ Sacar los recipientes al exterior o enfriarlos con agua pulverizada desde un lugar seguro. ▪ No extinguir la fuga de gas ardiendo si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva. ▪ Extinguir los otros fuegos. <p>Equipo de protección especial para la ac recomienda utilizar un equipo de respiración</p>	<p>4. PRIMEROS AUXILIOS</p> <p>Inhalación:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas de asfixia pueden incluir la pérdida de conciencia o movilidad. La víctima puede no haberse dado cuenta de que se asfixia. ▪ Retirar a la víctima a una zona no contaminada llevando colocado un equipo de respiración autónomo de presión positiva. ▪ Mantener a la víctima caliente y en reposo. ▪ Aplicarle la respiración artificial, si es preciso. ▪ Llamar al médico. <p>Contacto con la piel y los ojos: Sin efectos para la piel y los ojos</p> <p>Ingestión: La ingestión no está considerada como vía potencial de exposición.</p>

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE ESCAPE O VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales:

- Evacuar el área afectada.
- Asegurar la adecuada ventilación en el área.
- Utilizar equipos de respiración autónomos cuando se entre en una zona contaminada, a menos que se compruebe que la atmósfera es respirable.

Medidas a tomar en el área afectada:

Intentar detener el escape.

Métodos de limpieza: Ventilar el área afectada.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACÉN

- Asegúrese que la instalación está adecuadamente conectada a tierra.
- No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del recipiente.
- Debe prevenirse la entrada de agua al interior del recipiente.
- Utilizar únicamente equipo específicamente aprobado para este producto y para la presión y temperatura de utilización. En caso de duda contacte con el suministrador.
- Mantener lejos de fuentes de ignición, incluso de descargas de electricidad estática.
- Separar los gases oxidantes y otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Solicitar al suministrador las instrucciones para la manipulación de los recipientes.
- Mantener los recipientes por debajo de 50 °C, en un lugar bien ventilado.
- Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no se utilice el producto.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Valores límites de exposición: No establecidos.

Protección personal:

- No fumar cuando se manipule el producto.
- Asegurar una ventilación adecuada.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Peso molecular: 2

T_{fusión}: -259,20° C

T_{ebullición}: -252,76° C

T_{crítica}: -239,91° C

ρ_{relativa del gas (aire = 1):} 0,070 a 15° C

ρ_{relativa del líquido (agua = 1):} 0,07 a -253°C

Presión de vapor: No aplicable

Solubilidad en agua: 17,8 cm³/l a 20° C

Apariencia y color: Gas incoloro

Olor: Inodoro

T_{autoinflamación}: 560 ° C

Inflamabilidad (% de volumen en aire): 4 - 75

Otros datos: Se quema con llama invisible e incolora.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.
- Puede formar mezclas explosivas con el aire.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

General: No se conocen daños ecológicos causados por este producto.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Nº de identificación del producto: 1049

Clase y división: 2.1

Clasificación para transporte en carretera: 2,1 F

Clasificación para transporte en tren: 2,1 F

Nº de identificación del riesgo para transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID): 23

Etiquetas de peligro para el transporte por

Nº 3: Gas inflamable

Recomendaciones de seguridad para caso de accidente (TREM CARD):

Nº para el producto: 20

Nº para el grupo: 20g04

Transporte marítimo, Nº página Código

IMCO/IMDG: 2148

Clasificación para transporte aéreo

IATA/ICAO:

2.1 Solamente en aeronaves de carga

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

General: No se conocen efectos toxicológicos de este producto.

LC 50/1h: No aplicable.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN DE PRODUCTO

General:

- Se puede descargar a la atmósfera en lugares bien ventilados.
- No descargar en áreas donde exista riesgo de que se formen
- Mezclas explosivas con el aire.
- Contactar con el suministrador si se necesita orientación.

15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS

Nº de la sustancia según el Anexo I del

Real Decreto 363/1995 sobre

etiquetado: 001-001-00-9

Clasificación CEE: F +; R 12

Pictogramas:

F +: Extremadamente inflamable

Frases R: 12

Frases S: 9, 16, 33

16. OTRAS INFORMACIONES

Otras informaciones:

- Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad.
- Antes de utilizar el producto en un proceso nuevo o experimento, debe realizarse un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales utilizados.

10.2 Cloruro de hidrógeno

<p>1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA</p> <p>Nombre de producto: cloruro de hidrógeno Fórmula química: HCl Identificación de la empresa: PRAXAIR c/Orense, 11 28020 - MADRID</p>	<p>2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES</p> <p>Sustancia o mezcla: Sustancia. Componentes e impurezas: No contiene otros componentes o impurezas que puedan modificar la clasificación del producto.</p>
<p>3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gas licuado a presión. ▪ Corrosivo para los ojos, la piel y el sistema respiratorio. ▪ Tóxico por inhalación. 	<p>4. PRIMEROS AUXILIOS</p> <p>Inhalación:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Retirar a la víctima a una zona no contaminada llevando colocado un equipo de respiración autónomo de presión positiva. ▪ Mantener a la víctima caliente y en reposo. ▪ Aplicarle la respiración artificial, si es preciso. ▪ Llamar al médico.
<p>5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS</p> <p>Riesgos específicos: La exposición al fuego y explosión.</p> <p>Productos peligrosos de la combustión: Los mismos que el producto.</p> <p>Medios de extinción adecuados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se pueden utilizar todos los agentes extintores conocidos. <p>Medios específicos de actuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Si es posible detener la fuga de producto. ▪ Sacar los recipientes al exterior o enfriarlos con agua pulverizada desde un lugar seguro. <p>Equipo de protección especial para la actuación en incendios: Utilizar un equipo de respiración autónomo de presión positiva y ropa de protección química.</p>	<p>Contacto con la piel y los ojos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Puede causar graves quemaduras químicas en la piel y en las córneas. ▪ Lavar los ojos inmediatamente, al menos durante 15 minutos, con agua abundante. Levantar los párpados para mejorar el lavado. ▪ Quitar las ropas contaminadas, Mojar la zona afectada con agua abundante durante, al menos, 15 minutos. ▪ Obtener asistencia médica. <p>Ingestión: La ingestión no está considerada como vía potencial de exposición.</p>

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE ESCAPE O VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales:

- Evacuar el área afectada.
- Asegurar la adecuada ventilación en el área.
- Utilizar equipos de respiración autónomos cuando se entre en una zona contaminada, a menos que se compruebe que la atmósfera es respirable.

Medidas a tomar en el área afectada:

- Intentar detener el escape o derrame. La persona que lo realice debe llevar un equipo de respiración autónomo de presión positiva y ropa de protección química.
- Prevenir la entrada de producto en las alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o cualquier otro lugar donde la acumulación pudiera ser peligrosa.
- Reducir los vapores con agua en niebla o pulverizada.

Métodos de limpieza:

- Ventilar el área afectada.
- Regar la zona con agua abundante.
- Lavar el equipo y la zona contaminada con agua abundante.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACÉN

- Debe prevenirse la entrada de agua al interior del recipiente. No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del recipiente.
- Utilizar únicamente equipo específicamente aprobado para este producto y para la presión y temperatura de utilización. En caso de duda contacte con el suministrador.
- Separar de los gases inflamables y otros materiales inflamables durante el almacenamiento.
- Mantener los recipientes por debajo de 50° C, en un lugar bien ventilado.
- Solicitar al proveedor las instrucciones para la manipulación de los recipientes.
- Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no utilice el producto.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Valores límites de exposición:

- VLA-ED: 5 ppm.
- VLA-EC: 10 ppm.

Protección personal:

- Disponer de un equipo de respiración autónomo de presión positiva para uso en emergencias.
- Disponer de ropa de protección química, adecuada al producto, para uso en emergencias.
- Proteger los ojos, la cara y la piel de las salpicaduras del líquido.
- Asegurar una ventilación adecuada, en especial si trabaja en lugares confinados.
- No fumar cuando se manipule el producto.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Peso molecular: 36,5

Temperatura de fusión: - 114,24 °C.

Temperatura de ebullición: - 85,10 °C.

Temperatura crítica: 51,40 °C.

ρ relativa del gas (aire = 1): 1,67 a 15 °C.

ρ relativa del líquido (agua = 1): 1,19 a -85,1 °C.

Presión crítica: 82,58 bar.

Presión de vapor: 42,60 a 20 °C

Solubilidad en agua: 448 cm³/l a 20 °C.

Apariencia y color: Gas incoloro. Forma humos blancos al mezclarse con la humedad del aire.

Olor: Ácido, picante.

Inflamabilidad (% de volumen en aire):

No inflamable.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Reacciona con muchos metales en presencia de humedad, liberando hidrógeno, gas extremadamente inflamable.
- En contacto con el agua produce una rápida corrosión en algunos metales.
- Reacciona con el agua para formar ácidos corrosivos.
- Puede reaccionar violentamente con álcalis.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

General: En altas concentraciones puede producir graves corrosiones en los ojos, la piel y el tracto respiratorio.

LC50/1h: 190 ppm.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

General: Puede producir cambios en el pH de los sistemas ecológicos acuosos.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN DE PRODUCTO

General:

- Evitar descargar a la atmósfera.
- No descargar en lugares donde su acumulación pudiera resultar peligrosa por desplazamiento del aire.
- Contactar con el suministrador si se necesita orientación.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Nº de identificación del producto: 1050

Clase y división: 2.3, 8

Clasificación para el transporte por carretera y ferrocarril: 2,2°TC

Nº de identificación del riesgo para el transporte por carretera y ferrocarril: 268

Etiquetas de peligro para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

Nº 6.1: Sustancia tóxica.

Nº 8: Sustancia corrosiva.

Recomendaciones de seguridad para caso de accidente (TREM CARD):

Nº para el producto: 135

Nº para el grupo: 20g17

Transporte marítimo, Nº página Código IMCO/IMDG: 2150

Clasificación para transporte aéreo, Código IATA/ICAO: 2.3, 8. Prohibido.

**15. INFORMACIONES
REGLAMENTARIAS**

**Nº de la sustancia según el Anexo I del
Real Decreto 363/95 sobre etiquetado:**

017-002-00-2

Clasificación CEE: C; R 35.- Xi; R37

Pictogramas: C: Corrosivo.

Frases R: 35, 37

Frases S: 7/9, 26, 45

16. OTRAS INFORMACIONES**Otras informaciones:**

- Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de corrosividad y de toxicidad.
- Los usuarios de los equipos de respiración autónomos deben estar entrenados en su uso.
- Antes de utilizar el producto en un proceso nuevo o experimento, debe realizarse un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales utilizados.

10.3 Diclorosilano

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA

Nombre de producto: diclorosilano

Fórmula química: SiH_2Cl_2

Identificación de la empresa:

PRAXAIR

c/Orense, 11

28020 - MADRID

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

- Gas licuado a presión.
- Tóxico por inhalación.
- Corrosivo para los ojos, piel y sistema respiratorio.
- Extremadamente inflamable.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS

Riesgos específicos: La exposición al fuego de los recipientes puede causar su rotura o explosión.

Productos peligrosos de la combustión:

Si está involucrado en un fuego pueden producirse, por descomposición térmica, humos corrosivos o tóxicos de cloruro de hidrógeno y polvo de sílice (inerte, pero puede irritar el tracto respiratorio y los ojos).

Medios de extinción adecuados:

- Se pueden utilizar todos los agentes extintores conocidos.
- Medios específicos de actuación:
- Si es posible detener la fuga de producto.
- No extinguir la fuga de gas ardiendo si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva.
- Extinguir los otros fuegos.
- Sacar los recipientes al exterior o enfriarlos con agua pulverizada desde un lugar seguro.

Equipo de protección especial para la actuación en incendios:

Utilizar equipos de respiración autónomos de presión positiva y ropa de protección química.

2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Sustancia o mezcla: Sustancia.

Componentes e impurezas: No contiene otros componentes o impurezas que puedan modificar la clasificación del producto.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:

- Retirar a la víctima a una zona no contaminada llevando colocado un equipo de respiración autónomo de presión positiva y traje de protección química.
- Mantener a la víctima caliente y en reposo.
- Aplicarle la respiración artificial, si es preciso.
- Llamar al médico.

Contacto con la piel y los ojos:

- Puede producir graves quemaduras químicas a la piel y a las córneas, con distorsión temporal de la visión.
- Lavar los ojos inmediatamente, al menos durante 15 minutos.
- Levantar los párpados para mejorar el lavado.
- Quitar las ropas contaminadas. Lavar la parte de piel afectada con agua abundante, al menos durante 15 minutos.
- Obtener asistencia médica.

Ingestión:

- La ingestión no está considerada como vía potencial de exposición.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE ESCAPE O VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales:

- Evacuar el área afectada.
- Utilizar equipos de respiración autónomos de presión positiva y ropa de protección química.
- Asegurar la adecuada ventilación en el área.
- Eliminar las fuentes de ignición.

Medidas a tomar en el área afectada:

- Intentar detener el escape o derrame.
- La persona que lo realice debe llevar un equipo de respiración autónoma de presión positiva y ropa de protección química
- Prevenir la entrada de producto en las alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o cualquier otro lugar donde la acumulación pudiera ser peligrosa.
- Reducir los vapores de la fuga mediante la proyección agua pulverizada abundante.

Métodos de limpieza:

- Ventilar el área afectada.
- Regar la zona con agua abundante.
- Lavar el equipo y la zona contaminada con agua abundante.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Valores límites de exposición: No establecidos.

Protección personal:

- Asegurar una ventilación adecuada.
- Proteger los ojos, la cara y la piel de las salpicaduras de líquido.
- No fumar cuando se manipule el producto.
- Disponer de traje antiácido resistente al producto, para usar en caso de emergencia.
- Disponer de un equipo de respiración autónomo de P

7. MANIPULACIÓN Y ALMACÉN

- Asegurarse que la instalación está adecuadamente conectada a tierra.
- Debe prevenirse la entrada de agua al interior del recipiente.
- No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del recipiente.
- Purgar el aire de las instalaciones antes de introducir el producto.
- Utilizar únicamente equipo específicamente aprobado para este producto y para la presión y temperatura de utilización. En caso de duda contacte con el suministrador.
- Separar de los gases oxidantes y otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Mantener los recipientes por debajo de 50° C, en un lugar bien ventilado.
- Solicitar al suministrador las instrucciones para la manipulación de los recipientes.
- Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no utilice el producto.
- Mantener lejos de fuentes de ignición, incluso de descargas de electricidad estática.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Peso molecular: 101

T_{fusión}: -122 ° C.

T_{ebullición}: 8,40 ° C.

T_{crítica}: 176,30 ° C.

ρ_{relativa del gas (aire = 1):} 3,89 a 15 ° C.

ρ_{relativa del líquido (agua = 1):} 1,26 a 8,4 ° C.

P_{vapor}: 1,6 bar a 20 ° C.

Solubilidad en agua: Se hidroliza.

Apariencia y color: Gas incoloro.

Olor: Ácido, picante.

T_{autoinflamación}: 100° C.

Inflamabilidad (% de volumen en aire): 2,5 a 80°C.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.
- Puede formar mezclas explosivas con el aire.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**General:**

- Puede producir cambios en el pH de los sistemas ecológicos acuosos.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN DE PRODUCTO**General:**

- Evitar la descarga a la atmósfera.
- No descargar en áreas donde exista riesgo de que se formen mezclas explosivas con el aire.
- No descargar en lugares donde su acumulación pudiera resultar peligrosa.
- Los gases tóxicos y corrosivos formados durante la combustión deben ser lavados antes de ser descargados en la atmósfera.
- Contactar con el suministrador si se necesita orientación.

15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS

Nº de la sustancia según el Anexo I del Real Decreto

363/1995 sobre etiquetado:

* Sustancia no incluida en el Anexo I.

Clasificación CEE: Clasificación propuesta por la industria: F+; R12.- T; R23.- C; R34A.

Pictogramas: F+: Extremadamente inflamable.

T: Tóxico. C: Corrosivo.

Frases R: 12-23-34A

Frases S: 9/16/33A-26-36A-45

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**General:**

- En altas concentraciones puede producir corrosiones graves a la piel, ojos y tracto respiratorio.
- Posible edema pulmonar con desenlace mortal.
- Puede causar náuseas e irritación en el tracto respiratorio.
- La hidrólisis de los silanos en el cuerpo forma ácido silícico o sílice hidratada.

LC50/1h: 314 ppm.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Nº de identificación (Nº ONU): 2189

Clase y división: 2.3, 2.1, 8

Clasificación para el transporte por carretera

y ferrocarril (ADR/RID): 2,3^oTFC

Nº de identificación del riesgo para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/ID): No aplicable.

Etiquetas de peligro para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

Nº 6.1: Sustancia tóxica.

Nº 3: Gas inflamable.

Transporte marítimo, Nº página

(IMCO/IMDG): 2131

Clasificación para transporte aéreo (IATA/ICAO): 2.3, 2,1. Prohibido.

16. OTRAS INFORMACIONES**Otras informaciones:**

Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad. Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de toxicidad y corrosividad. Los usuarios de los equipos de respiración autónomos deben estar entrenados en su uso. Antes de utilizar el producto en un proceso nuevo o experimento, debe realizarse un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales utilizados.

10.4 Triclorosilano

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA

Nombre de producto: triclorosilano

Fórmula química: SiHCl_3

Identificación de la empresa:

PRAXAIR

c/Orense, 11

28020 - MADRID

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

- Gas licuado a presión.
- Tóxico por inhalación.
- Corrosivo para los ojos, piel y sistema respiratorio.
- Extremadamente inflamable.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS

Riesgos específicos: La exposición al fuego de los recipientes puede causar su rotura o explosión.

Productos peligrosos de la combustión:

Si está involucrado en un fuego pueden producirse, por descomposición térmica, humos corrosivos o tóxicos de cloruro de hidrógeno y polvo de sílice (inerte, pero puede irritar el tracto respiratorio y los ojos).

Medios de extinción adecuados:

- Se pueden utilizar todos los agentes extintores conocidos.
- Medios específicos de actuación:
- Si es posible detener la fuga de producto.
- No extinguir la fuga de gas ardiendo si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva.
- Extinguir los otros fuegos.
- Sacar los recipientes al exterior o enfriarlos con agua pulverizada desde un lugar seguro.

Equipo de protección especial para la actuación en incendios:

Utilizar equipos de respiración autónomos de presión positiva y ropa de protección química.

2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Sustancia o mezcla: Sustancia.

Componentes e impurezas: No contiene otros componentes o impurezas que puedan modificar la clasificación del producto.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:

- Retirar a la víctima a una zona no contaminada llevando colocado un equipo de respiración autónomo de presión positiva y traje de protección química.
- Mantener a la víctima caliente y en reposo.
- Aplicarle la respiración artificial, si es preciso.
- Llamar al médico.

Contacto con la piel y los ojos:

- Puede producir graves quemaduras químicas a la piel y a las córneas, con distorsión temporal de la visión.
- Lavar los ojos inmediatamente, al menos durante 15 minutos.
- Levantar los párpados para mejorar el lavado.
- Quitar las ropas contaminadas. Lavar la parte de piel afectada con agua abundante, al menos durante 15 minutos.
- Obtener asistencia médica.

Ingestión:

- La ingestión no está considerada como vía potencial de exposición.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE ESCAPE O VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales:

- Evacuar el área afectada.
- Utilizar equipos de respiración autónomos de presión positiva y ropa de protección química.
- Asegurar la adecuada ventilación en el área.
- Eliminar las fuentes de ignición.

Medidas a tomar en el área afectada:

- Intentar detener el escape o derrame.
- La persona que lo realice debe llevar un equipo de respiración autónoma de presión positiva y ropa de protección química
- Prevenir la entrada de producto en las alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o cualquier otro lugar donde la acumulación pudiera ser peligrosa.
- Reducir los vapores de la fuga mediante la proyección agua pulverizada abundante.

Métodos de limpieza:

- Ventilar el área afectada.
- Regar la zona con agua abundante.
- Lavar el equipo y la zona contaminada con agua abundante.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Valores límites de exposición: No establecidos.

Protección personal:

- Asegurar una ventilación adecuada.
- Proteger los ojos, la cara y la piel de las salpicaduras de líquido.
- No fumar cuando se manipule el producto.
- Disponer de traje antiácido resistente al producto, para usar en caso de emergencia.
- Disponer de un equipo de respiración autónomo de P

7. MANIPULACIÓN Y ALMACÉN

- Asegurarse que la instalación está adecuadamente conectada a tierra.
- Debe prevenirse la entrada de agua al interior del recipiente.
- No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del recipiente.
- Purgar el aire de las instalaciones antes de introducir el producto.
- Utilizar únicamente equipo específicamente aprobado para este producto y para la presión y temperatura de utilización. En caso de duda contacte con el suministrador.
- Separar de los gases oxidantes y otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Mantener los recipientes por debajo de 50° C, en un lugar bien ventilado.
- Solicitar al suministrador las instrucciones para la manipulación de los recipientes.
- Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no utilice el producto.
- Mantener lejos de fuentes de ignición, incluso de descargas de electricidad estática.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Peso molecular: 135,5 g/mol

T_{fusión}: 145 K.

T_{ebullición}: 305 K.

T_{crítica}: 479 K.

ρ_{relativa del gas (aire = 1):} 4,7 a 294,15 K.

ρ_{relativa del líquido (agua = 1):} 1,33 a 298,15K.

P_{vapor}: 44,2 kPa a 10 ° C.

Solubilidad en agua: Se hidroliza.

Apariencia y color: Gas incoloro.

Olor: Ácido, picante.

T_{autoinflamación}: 488,15 K.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.
- Puede formar mezclas explosivas con el aire.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**General:**

- Puede producir cambios en el pH de los sistemas ecológicos acuosos.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN DE PRODUCTO**General:**

- Evitar la descarga a la atmósfera.
- No descargar en áreas donde exista riesgo de que se formen mezclas explosivas con el aire.
- No descargar en lugares donde su acumulación pudiera resultar peligrosa.
- Los gases tóxicos y corrosivos formados durante la combustión deben ser lavados antes de ser descargados en la atmósfera.
- Contactar con el suministrador si se necesita orientación.

15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS

Nº de la sustancia según el Anexo I del Real Decreto

363/1995 sobre etiquetado:

* Sustancia no incluida en el Anexo I.

Clasificación CEE: Clasificación propuesta por la industria: F+; R12.- T; R23.- C; R34A.

Pictogramas: F+: Extremadamente inflamable.

T: Tóxico. C: Corrosivo.

Frases R: 12-23-34A

Frases S: 9/16/33A-26-36A-45

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**General:**

- En altas concentraciones puede producir corrosiones graves a la piel, ojos y tracto respiratorio.
- Posible edema pulmonar con desenlace mortal.
- Puede causar náuseas e irritación en el tracto respiratorio.
- La hidrólisis de los silanos en el cuerpo forma ácido silícico o sílice hidratada.

LC50/1h: 325 ppm.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Nº de identificación (Nº ONU): 2193

Clase y división: 2.3, 2.1, 8

Clasificación para el transporte por carretera

y ferrocarril (ADR/RID): 2,3°FTC

Nº de identificación del riesgo para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/ID): No aplicable.

Etiquetas de peligro para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

Nº 6.1: Sustancia tóxica.

Nº 3: Gas inflamable.

Transporte marítimo, Nº página

(IMCO/IMDG): 2131

Clasificación para transporte aéreo (IATA/ICAO): 2.3, 2,1. Prohibido.

16. OTRAS INFORMACIONES**Otras informaciones:**

Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad. Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de toxicidad y corrosividad. Los usuarios de los equipos de respiración autónomos deben estar entrenados en su uso. Antes de utilizar el producto en un proceso nuevo o experimento, debe realizarse un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales utilizados.

10.5 Tetracloruro de silicio

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA

Nombre de producto: tetraclorosilano

Fórmula química: SiCl₄

Identificación de la empresa:

PRAXAIR

c/Orense, 11

28020 - MADRID

2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Sustancia o mezcla: Sustancia.

Componentes e impurezas: No contiene otros componentes o impurezas que puedan modificar la clasificación del producto.

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

- Gas licuado a presión.
- Tóxico por inhalación.
- Corrosivo para los ojos, piel y sistema respiratorio.
- Extremadamente inflamable.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:

- Retirar a la víctima a una zona no contaminada llevando colocado un equipo de respiración autónomo de presión positiva y traje de protección química.
- Mantener a la víctima caliente y en reposo.
- Aplicarle la respiración artificial, si es preciso.
- Llamar al médico.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS

Riesgos específicos: La exposición al fuego de los recipientes puede causar su rotura o explosión.

Productos peligrosos de la combustión:

Si está involucrado en un fuego pueden producirse, por descomposición térmica, humos corrosivos o tóxicos de cloruro de hidrógeno y polvo de sílice (inerte, pero puede irritar el tracto respiratorio y los ojos).

Medios de extinción adecuados:

- Se pueden utilizar todos los agentes extintores conocidos.
- Medios específicos de actuación:
- Si es posible detener la fuga de producto.
- No extinguir la fuga de gas ardiendo si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva.
- Extinguir los otros fuegos.
- Sacar los recipientes al exterior o enfriarlos con agua pulverizada desde un lugar seguro.

Contacto con la piel y los ojos:

- Puede producir graves quemaduras químicas a la piel y a las córneas, con distorsión temporal de la visión.
- Lavar los ojos inmediatamente, al menos durante 15 minutos.
- Levantar los párpados para mejorar el lavado.
- Quitar las ropas contaminadas. Lavar la parte de piel afectada con agua abundante, al menos durante 15 minutos.
- Obtener asistencia médica.

Ingestión:

- La ingestión no está considerada como vía potencial de exposición.

Equipo de protección especial para la actuación en incendios:

Utilizar equipos de respiración autónomos de presión positiva y ropa de protección química.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE ESCAPE O VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales:

- Evacuar el área afectada.
- Utilizar equipos de respiración autónomos de presión positiva y ropa de protección química.
- Asegurar la adecuada ventilación en el área.
- Eliminar las fuentes de ignición.

Medidas a tomar en el área afectada:

- Intentar detener el escape o derrame.
- La persona que lo realice debe llevar un equipo de respiración autónoma de presión positiva y ropa de protección química
- Prevenir la entrada de producto en las alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o cualquier otro lugar donde la acumulación pudiera ser peligrosa.
- Reducir los vapores de la fuga mediante la proyección agua pulverizada abundante.

Métodos de limpieza:

- Ventilar el área afectada.
- Regar la zona con agua abundante.
- Lavar el equipo y la zona contaminada con agua abundante.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Valores límites de exposición: No establecidos.

Protección personal:

- Asegurar una ventilación adecuada.
- Proteger los ojos, la cara y la piel de las salpicaduras de líquido.
- No fumar cuando se manipule el producto.
- Disponer de traje antiácido resistente al producto, para usar en caso de emergencia.
- Disponer de un equipo de respiración autónomo de P

7. MANIPULACIÓN Y ALMACÉN

- Asegurarse que la instalación está adecuadamente conectada a tierra.
- Debe prevenirse la entrada de agua al interior del recipiente.
- No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del recipiente.
- Purgar el aire de las instalaciones antes de introducir el producto.
- Utilizar únicamente equipo específicamente aprobado para este producto y para la presión y temperatura de utilización. En caso de duda contacte con el suministrador.
- Separar de los gases oxidantes y otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Mantener los recipientes por debajo de 50° C, en un lugar bien ventilado.
- Solicitar al suministrador las instrucciones para la manipulación de los recipientes.
- Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no utilice el producto.
- Mantener lejos de fuentes de ignición, incluso de descargas de electricidad estática.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Peso molecular: 167 g/mol.

T_{fusión}: 304,35 K.

T_{ebullición}: 330,8 K.

T_{crítica}: 508,1 K.

ρ_{relativa del gas (aire = 1):} 5,9 a 294,15K.

ρ_{relativa del líquido (agua = 1):} 1,47 a 298,15K.

P_{vapor}: 16,4 kPa a 10 ° C.

Solubilidad en agua: Se hidroliza.

Apariencia y color: Gas incoloro.

Olor: Ácido, picante.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.
- Puede formar mezclas explosivas con el aire.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**General:**

- Puede producir cambios en el pH de los sistemas ecológicos acuosos.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN DE PRODUCTO**General:**

- Evitar la descarga a la atmósfera.
- No descargar en áreas donde exista riesgo de que se formen mezclas explosivas con el aire.
- No descargar en lugares donde su acumulación pudiera resultar peligrosa.
- Los gases tóxicos y corrosivos formados durante la combustión deben ser lavados antes de ser descargados en la atmósfera.
- Contactar con el suministrador si se necesita orientación.

15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS

Nº de la sustancia según el Anexo I del Real Decreto

363/1995 sobre etiquetado:

* Sustancia no incluida en el Anexo I.

Clasificación CEE: Clasificación propuesta por la industria: F+; R12.- T; R23.- C; R34A.

Pictogramas: F+: Extremadamente inflamable.

T: Tóxico. C: Corrosivo.

Frases R: 12-23-34A

Frases S: 9/16/33A-26-36A-45

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**General:**

- En altas concentraciones puede producir corrosiones graves a la piel, ojos y tracto respiratorio.
- Posible edema pulmonar con desenlace mortal.
- Puede causar náuseas e irritación en el tracto respiratorio.
- La hidrólisis de los silanos en el cuerpo forma ácido silícico o sílice hidratada.

LC50/1h: 314 ppm.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Nº de identificación (Nº ONU): 2197

Clase y división: 2.3, 2.1, 8

Clasificación para el transporte por carretera

y ferrocarril (ADR/RID): 2,3^oTFC

Nº de identificación del riesgo para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/ID): No aplicable.

Etiquetas de peligro para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

Nº 6.1: Sustancia tóxica.

Nº 3: Gas inflamable.

Transporte marítimo, Nº página (IMCO/IMDG): 2131

Clasificación para transporte aéreo (IATA/ICAO): 2.3, 2,1. Prohibido.

16. OTRAS INFORMACIONES

Otras informaciones: Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad. Asegúrese que los operarios conocen el riesgo de toxicidad y corrosividad. Los usuarios de los equipos de respiración autónomos deben estar entrenados en su uso. Antes de utilizar el producto en un proceso nuevo o experimento, debe realizarse un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales utilizados.

10.6 Silicio de grado metalúrgico

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA

Nombre de producto: silicio

Fórmula química: Si

Identificación de la empresa:

FERROATLANTICA, S.L.

POL. IND. DE SABON

15142 - LA CORUÑA (ESPAÑA)

2. COMPOSICIÓN

Sustancia o mezcla: Sustancia.

Componentes e impurezas:

- Al: 0,10 % a 1,50 %
- Ca: 0,01 % a 1,00 %
- Fe: 0,15 % a 1,50 %
- Otros elementos: C, S, Mg, Mn, Ni, Cr, V, Ti, B, Pb, P : En concentraciones individuales inferiores al 0,10 %

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

- El silicio no está considerado como nocivo para la salud.
- En forma de hojuelas y/o piedras puede producir cortes o arañazos.
- En polvo, por inhalación masiva o tiempo de exposición prolongado, puede ocasionar irritaciones en vías respiratorias y ojos.

4. PRIMEROS AUXILIOS

- En caso de cortes o arañazos recurrir a los Servicios Sanitarios.
- En caso de irritación por inhalación, el afectado deberá tratar de limpiar las vías respiratorias y respirar en un ambiente de aire fresco.
- Las irritaciones por contacto con los ojos requieren lavado con chorro de agua abundante y no frotarlos.
- Si persisten los síntomas acudir al Servicio Médico.
- Ingestión: El silicio carece de toxicidad, pero no debe ingerirse.

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

- El producto, en forma de hojuelas o de piedras con brillo metálico, no es combustible ni inflamable ni facilita la combustión de otros materiales.
- En forma pulverulenta, bajo las condiciones recogidas en la sección 10 de este documento, puede ser inflamable.
- Combatir con CO₂.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

- Material inocuo.
- Recoger para recuperación y reciclado.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACÉN

Manipular y almacenar en locales secos y con buena ventilación.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN INDIVIDUAL

- Dependiendo del tamaño del producto en su presentación, durante la manipulación puede dar lugar a la producción de polvo y, además, sus fragmentos presentan frecuentemente aristas cortantes. Por ello se deberá exigir protección respiratoria con mascarilla anti-polvo así como guantes resistentes a cortes y punciones en las manos y gafas o pantallas de seguridad para los ojos.
- Todos los medios de protección deberán estar homologados según las normativas nacionales.
- Otras protecciones: Se recomienda el empleo de ropas de trabajo apropiadas para manipulación de materias minerales.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

El Silicio es un producto inorgánico sólido, cristalino, de color gris plateado en piedras u hojuelas y gris-negro o pardonegro en polvo.

Olor	: Inodoro
Dureza.....	: 7 (escala de Rydberg)
Densidad a 20 °C	: 2'33 gr / cc
Temperatura de fusión / ebullición.....	: 1430 °C / 2360 °C
Viscosidad a 1430 °C.....	: 0,94 mN seg / m2
Resistividad eléctrica a 20° C.....	: 105 microhm / cm
Constante dieléctrica.....	: 13

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Solubilidad y reactividad

Insoluble en agua.

Inatacable por los ácidos aplicados individualmente, excepto por el ácido fluorhídrico que lo hace levemente sobre el producto en polvo. Éste, combinado con ciertos oxidantes (por ejemplo ácido nítrico) activa la reacción, que es muy viva.

Reacciona con los hidróxidos alcalinos liberando hidrógeno. La reacción es tanto más activa cuanto menor es la granulometría del silicio y si se incrementa la temperatura.

Los halógenos reaccionan directamente sobre el silicio en polvo: El flúor lo hace a temperatura ordinaria; el cloro a 300 – 400 °C; a temperaturas progresivamente superiores lo hacen el bromo y el yodo.

Inflamabilidad / Explosividad

En forma de hojuelas o de piedras cristalinas el silicio no es inflamable.

El producto en polvo, en condiciones normales, no tiene tendencia a la inflamabilidad tanto si se encuentra depositado en capas o en estado de suspensión. No obstante, en este último caso, puede inflamarse bajo la acción de una fuente de ignición vigorosa y en contacto con sustancias comburentes.

Se han documentado casos de explosión de silicio en polvo sometido a percusión o aplastamiento mecánico.

Las causas se atribuyen a humedad en el producto o a presencia de siliciuros de calcio, o a ambos factores a la vez.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Carece de toxicidad

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

No es biodegradable

No afecta al entorno medioambiental

13. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Las silicoaleaciones con más del 90 % de silicio no están sujetas al ADR y no requieren etiquetaje especial para materiales peligrosos.

Transporte por carretera

El producto en forma de hojuelas o piedras podrá viajar a granel entoldado, en contenedores o en “big-bag’s” cerrados. El producto en polvo irá siempre envasado en “big-bag’s” u otros envases cerrados.

Transporte por vía marítima

El producto irá en contenedores o envasado en “big-bags” cerrados, cuando se presente en forma de piedras u hojuelas. El producto en polvo irá siempre envasado en “big-bag’s” u otros envases cerrados.

Condiciones de Estiba, Categoría A, en cubierta o bajo cubierta.

Transporte por aéreo

No se mencionan condiciones especiales.

Clasificación para transporte

ONU : No clasificado **IMDG** : No clasificado **ADR / RID** : No clasificado **ICAO / IATA** : No clasificado

ANEXO 11: Análisis Hazop

11.1 Condensador parcial (E-110)

Línea	Palabra guía	Desviaciones	Causas	Consecuencias	Acciones
Entrada de agua de refrigeración	NO	No hay alimentación	1. Bomba averiada. 2. Rotura de línea.	- No se produce el enfriamiento de línea principal. - La unidad no desempeña su función.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 2. Reparación e inspecciones periódicas.
	MENOS	Disminución de caudal	1. Fugas en conductos. 2. Obturación a la entrada del cambiador. 3. Avería de la válvula de entrada. 4. Avería del controlador de flujo másico de la corriente.	- Poco caudal de agua de refrigeración. - No se producirá el enfriamiento hasta la temperatura deseada.	1,2,3,4. Alarma de bajo nivel. 1,3,4. Inspección periódica. 2. Limpieza (en caso de producirse depósitos sólidos).

Línea	Palabra guía	Desviaciones	Causas	Consecuencias	Acciones
	MÁS	Aumento del caudal	1. Avería en la válvula de entrada. 2. Avería del controlador de flujo másico de esta corriente.	- Innecesaria disminución de la temperatura de la corriente a enfriar. - Gasto de agua innecesario.	1,2. Alarma de alto nivel. 1,2. Inspección periódica.
Salida de agua de refrigeración	NO	No existe flujo	1. Rotura del equipo. 2. obturación de los conductos.	- No se produce el enfriamiento de la corriente caliente.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 2. Limpieza.
	MÁS	Aumento del caudal	1. Avería en la válvula de salida. 2. Avería del controlador de flujo másico de esta corriente.	- No se produce un correcto enfriamiento.	1,2. Alarma de alto nivel. 1,2. Inspección periódica.
Entrada de corriente caliente	NO	No existe flujo	1. Bomba averiada. 2. Rotura de línea.	- Pérdida de la mezcla objeto del proceso.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 1,2. Alarma de nivel.
	MÁS	Aumento del caudal	1. Bombas averiadas. 2. Avería en la válvula de entrada. 3. Avería del controlador de flujo másico de esta corriente.	- No se produce el enfriamiento adecuado.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 1,2,3. Reparación e inspecciones periódicas.

Línea	Palabra guía	Desviaciones	Causas	Consecuencias	Acciones
	MENOS	Disminución de caudal	1. Bombas averiadas. 2. Avería en la válvula de salida. 3. Avería del controlador de flujo másico de esta corriente.	- Se produce un enfriamiento innecesario.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 1,2,3. Reparación e inspecciones periódicas.
Salida de corriente caliente	NO	No hay flujo	1. Obturación de los orificios de salida. 2. Rotura de línea.	- Pérdida de la mezcla objeto del proceso.	1. Limpieza. 2. Alarma de nivel.
	MÁS	Aumento del caudal	1. Bombas averiadas. 2. Avería en la válvula de entrada. 3. Avería del controlador de flujo másico de esta corriente.	- No se produce el enfriamiento adecuado.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 1,2,3. Reparación e inspecciones periódicas.
	MENOS	Disminución del flujo	1. Bombas averiadas. 2. Avería en la válvula de salida. 3. Avería del controlador de flujo másico de esta corriente.	- Se produce un enfriamiento innecesario.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 1,2,3. Reparación e inspecciones periódicas.

11.2 Separador (D-210)

Línea	Palabra guía	Desviaciones	Causas	Consecuencias	Acciones
Entrada de alimentación	NO	No hay alimentación	1. Bomba averiada. 2. Rotura de línea.	- No se produce la separación de fases en equilibrio. - La unidad no desempeña su función.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 2. Reparación e inspecciones periódicas.
	MENOS	Disminución de caudal	1. Fugas en conductos. 2. Obturación a la entrada del cambiador.	- Se está produciendo una pérdida de la corriente de interés.	1. Inspección periódica. 2. Limpieza (en caso de producirse depósitos sólidos).
	MÁS	Aumento del caudal	1. Aumento del caudal que llega a la sección anterior.	- La unidad no está diseñada para ese caudal, por lo que no se produce una separación adecuada.	1. Alarma de alto nivel. 1. Nuevo diseño de la unidad. 1. Control en unidades anteriores.
Salida de destilado	NO	No existe flujo	1. Obturación total en conductos. 2. No se produce la separación.	- La unidad no funciona correctamente.	1. Limpieza. 2. Alarma de nivel.
	MÁS	Aumento del caudal	1. La temperatura de equilibrio aumenta. 2. La presión de equilibrio aumenta.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.

Línea	Palabra guía	Desviaciones	Causas	Consecuencias	Acciones
	MENOS	Disminución de caudal	1. La temperatura de equilibrio disminuye. 2. La presión de equilibrio disminuye.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.
Salida de residuo	NO	No hay flujo	1. Obturación total en conductos. 2. No se produce la separación, todo sale por el destilado.	- La unidad no funciona correctamente.	1. Limpieza. 2. Alarma de nivel.
	MENOS	Disminución del flujo	1. La temperatura de equilibrio aumenta. 2. La presión de equilibrio aumenta.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.
	MÁS	Aumento del caudal	1. La temperatura de equilibrio disminuye. 2. La presión de equilibrio disminuye.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.

11.3 Columnas de destilación (D310 y D-320)

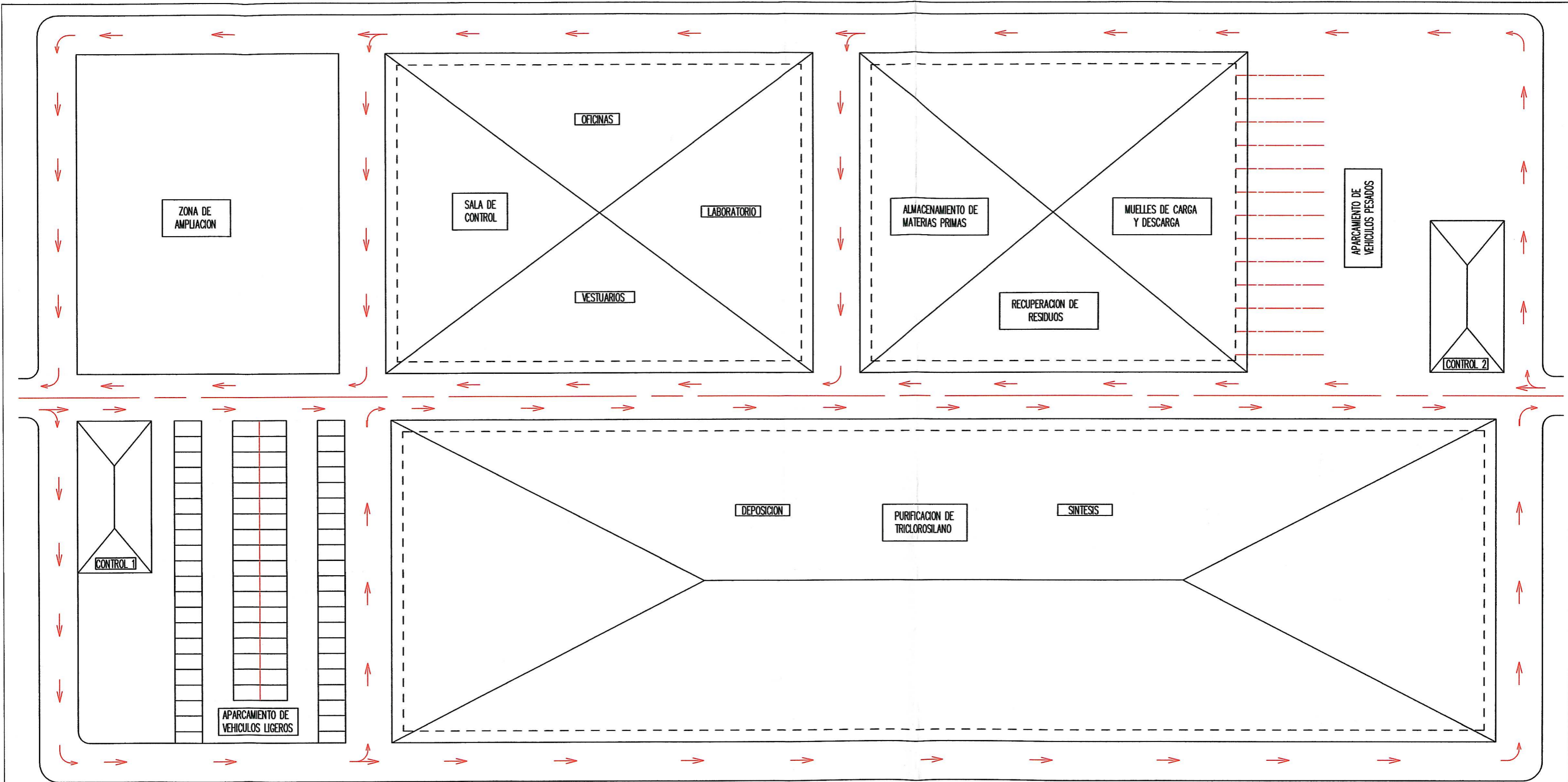
Línea	Palabra guía	Desviaciones	Causas	Consecuencias	Acciones
Entrada de alimentación	NO	No hay alimentación	1. Bomba averiada. 2. Rotura de línea.	- No se produce la separación de fases en equilibrio. - La unidad no desempeña su función.	1. Reparación y disposición de equipo auxiliar. 2. Reparación e inspecciones periódicas.
	MENOS	Disminución de caudal	1. Fugas en conductos. 2. Obturación a la entrada del cambiador.	- Se está produciendo una pérdida de la corriente de interés.	1. Inspección periódica. 2. Limpieza (en caso de producirse depósitos sólidos).
	MÁS	Aumento del caudal	1. Aumento del caudal que llega a la sección anterior.	- La unidad no está diseñada para ese caudal, por lo que no se produce una separación adecuada. - No se va a purificar el triclorosilano.	1. Alarma de alto nivel. 1. Nuevo diseño de la unidad. 1. Control en unidades anteriores.
Salida de destilado	NO	No existe flujo	1. Obturación total en conductos. 2. No se produce la separación.	- La unidad no funciona correctamente.	1. Limpieza. 2. Alarma de nivel.
	MÁS	Aumento del caudal	1. La temperatura de equilibrio aumenta. 2. La presión de equilibrio aumenta.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.

Línea	Palabra guía	Desviaciones	Causas	Consecuencias	Acciones
	MENOS	Disminución de caudal	1. La temperatura de equilibrio disminuye. 2. La presión de equilibrio disminuye.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.
	PARTE DE	Compuestos en destilado en estado gaseoso	1. El condensador de la columna no funciona correctamente.	- Los compuestos en la corriente destilado se encuentran en dos fases. - Dificultad para la impulsión de los mismos.	1. Reparación e inspección periódica del condensador.
Salida de residuo	NO	No hay flujo	1. Obturación total en conductos. 2. No se produce la separación, todo sale por el destilado.	- La unidad no funciona correctamente.	1. Limpieza. 2. Alarma de nivel.
	MENOS	Disminución del flujo	1. La temperatura de equilibrio aumenta. 2. La presión de equilibrio aumenta.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.
	MÁS	Aumento del caudal	1. La temperatura de equilibrio disminuye. 2. La presión de equilibrio disminuye.	- Se está produciendo una separación inadecuada.	1. Alarma de temperatura. 2. Alarma de presión. 1,2. Reparación e inspecciones periódicas de la unidad de control.

ANEXO12: Legislación aplicable a este proyecto

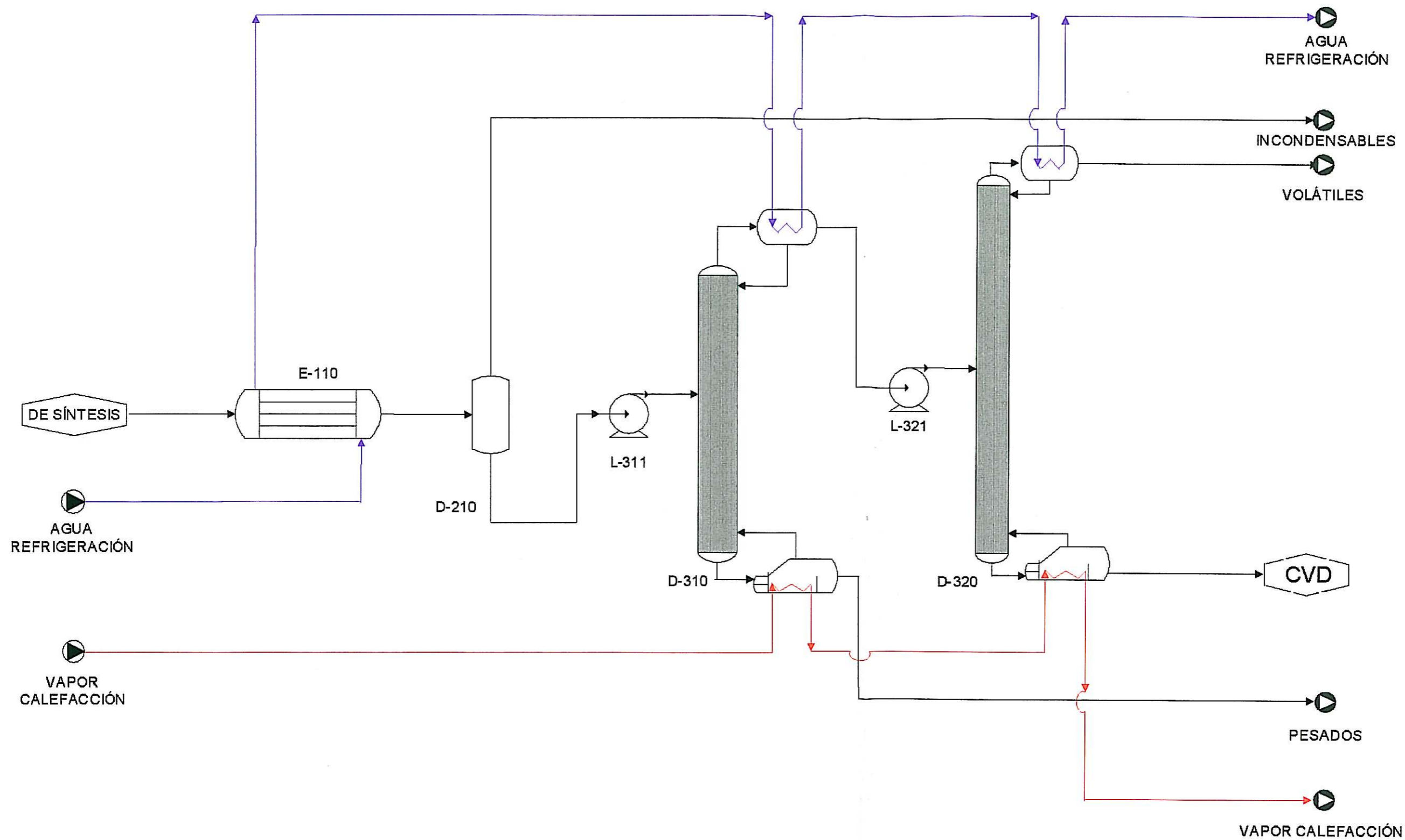
En este apartado se expone la legislación actual aplicable a este proyecto:

- Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo por el que se aprueba el reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas.
- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos
- Real Decreto 379/2001, de abril por el que se aprueba el reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-1, MIE-APQ-5, MIE-APQ-6 y MIE-APQ-7.
- Ley 31/95 de Prevención de Riesgos Laborales
- Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas
- Real Decreto 374/2001. Sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción
- Real Decreto 1244/1979, de 4 de Abril de 1979, por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión
- Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, prole que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación del Impacto Ambiental (BOE núm. 239, de 5 de octubre de 1988



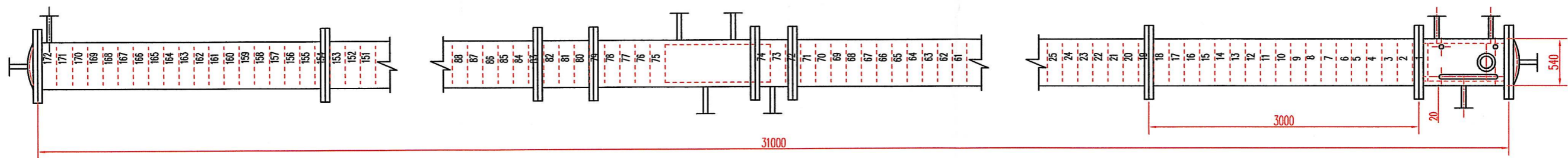
UNIDAD DE PURIFICACION "PROCESO SIEMENS"

	FECHA	NOMBRE	DESIGNACION:	PLANO N.
Dibujado	15/10/06	DANIEL VAZQUEZ	PLANO DE IMPLANTACION	1-3
Compr.	15/10/06	DANIEL VAZQUEZ		ESCALA
		<i>Daniel Vazquez</i>		1/1000



UNIDAD DE PURIFICACION "PROCESO SIEMENS"

	FECHA	NOMBRE	DESIGNACION:	PLANO N.
Dibujado	15/10/06	DANIEL VAZQUEZ	UNIDAD DE SEPARACIÓN	2-3
Compr.	15/10/06	DANIEL VAZQUEZ		ESCALA
		<i>[Signature]</i>		1/200



UNIDAD DE PURIFICACION "PROCESO SIEMENS"

	FECHA	NOMBRE	DESIGNACION:	PLANO.N.
Dibujado	15/10/06	DANIEL VAZQUEZ	COLUMNA D 310	3-3
Comp.	15/10/06	DANIEL VAZQUEZ		ESCALA
		<i>[Signature]</i>		1/50

