UNIVERSITAT ROVIRA i VIRGILI

Escola Tecnica Superior d'Enginyeria Quimica

DISEÑO DE UN NUEVO LAVADOR DE GASES

Trabajo de Fin de Grado

Identificador:	TFGEQ_1911
Autor:	Alba María Galve García
Tutores:	Baltasar Boix Rita
	Luca Sanminiatelli Salas
Fecha de entrega:	12 de junio de 2019

Departament d'Enginyeria Química. Universitat Rovira i Virgili.
Autorització pel lliurament i defensa del TFG del grau d'Enginyeria Química

TÍTOL DEL TFGEQ: DISEÑO DE UN LAVADOR DE GASES

AUTOR: ALBA MARÍA GALVE GARCÍA

CURS ACADÈMIC: 2019

VIST I PLAU DEL TUTOR ACADÈMIC

En/Na Baltasar Boix Rita, en la seva capacitat de tutor acadèmic fa constar que considera el TFGEQ

☑ APTE, i en conseqüència dona el seu vist i plau per a la defensa

☐ NO APTE per a ser defensat pels motius exposats a continuació

Signatura: BOIX RITA, BALTASAR (FIRMA)

Firmado digitalmente por BOIX RITA, BALTASAR (FIRMA)
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, serialNumber=39663651J, sn=BOIX, givenName=BALTASAR, cn=BOIX RITA, BALTASAR (FIRMA)
Fecha: 2019.06.11 12:40:12 +02'00'

Data: 11/06/2019

DECLARACIÓ D'ABSÈNCIA DE CONFLICTES DE CONFIDENCIALITAT

En/Na LUCA SANMINIATELLI, en la seva capacitat de supervisor extern(*) del treball fa constar que ha revisat el contingut del TFGEQ i que no conté cap informació que pugui ser considerada com confidencial per part de l'empresa REPSOL

(*) Cas que el TFGEQ no sigui extern serà el professor tutor qui emplenarà aquesta secció

Signatura:

Data: 11/06/2019

Contenido

1. INTRODUCCIÓN....6
1.1. Agradecimientos....6
1.2. Resumen....6
2. ETAPA PRELIMINAR....8
2.1. Definición y descripción del proyecto....8
2.2. Alcance del proyecto....9
2.3. Antecedentes históricos....10
2.4. Estudio de alternativas....10
2.4.1. Alternativa A: En serie, Corriente completa....11
2.4.2. Alternativa B: En serie, Corriente parcial....11
2.4.3. Alternativa C: En paralelo....12
2.5. Planificación del proyecto....12
2.6. Contacto con suministradores....14
2.7. Laboratorio....14
2.7.1. Desarrollo experimental....15
2.7.2. Resultados....16
2.7.3. Conclusión....22
3. BASES DE DISEÑO PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO....23
3.1. Especificación de las alimentaciones....23
3.2. Especificación de la corriente de emisiones a la atmósfera....25
3.3. Capacidad operativa y factor de servicio....25
3.4. Normas y códigos de diseño....25
3.5. Especificaciones de los servicios disponibles....26
3.5.1. Condensado....26
3.5.2. Agua de refrigeración....27
3.5.3. Energía eléctrica....27
3.5.4. Nitrógeno....28
3.5.5. Aire....28
3.5.6. Localización....29
4. DESARROLLO DE LA INGENIERÍA BÁSICA DEL PROYECTO....30

4.1. Simulación de la instalación en Hysys 30
4.1.1. Corrientes de entrada al *Scrubber* actual D-1002 30
4.1.2. Estudio de los parámetros de la nueva instalación 30
4.1.3. Configuración de la instalación 34
4.1.4. Resultados 45
4.1.5. Simulación de la alternativa final 46
4.2. Elaboración de diagramas 50
4.2.1. Diagrama de bloques 51
4.2.2. Diagrama del proceso 52
4.2.3. Diagrama de tuberías e instrumentación 53
4.2.4. Simbología 54
4.2.5. Diagrama de implantación 55
4.3. Diseño y listado de tuberías 56
4.3.1. Diseño de las tuberías 56
4.3.2. Listado de tuberías 59
4.4. Diseño del sistema de control 61
4.4.1. Descripción funcional de la nueva instalación 61
4.4.2. Listado de elementos de control 61
4.5. Diseño de equipos 69
4.5.1. Hoja de especificación del lavador de gases D-1001 69
4.5.2. Hoja de especificación de los intercambiadores E-1001 y E-1002 74
4.5.3. Hoja de especificación de las bombas G-1001A/B 78
5. SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN 80
5.1. *Hazard and operability* 81
5.2. Enclavamientos de la instalación 84
6. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL DE LA INSTALACIÓN 85
6.1. Emisiones 85
6.2. Residuos líquidos 88
7. EVALUACIÓN ECONÓMICA 89
7.1. Estudio de la viabilidad de la nueva instalación 89

7.2. Cuenta de resultados de la nueva instalación 91
7.3. Evaluación global del proyecto 92
8. BIBLIOGRAFÍA 93
A.1. Diagrama de Gantt 94
A.2. Suministradores 95
A.2.1. Sulzer 95
A.2.2. Spraying Sysems Co. 97
A.3. Características técnicas de las bombas G-1001A/B. 99
A.4. Balance de energía de la instalación 100

1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1. Información técnica del proyecto.

Título	Diseño de un nuevo lavador de gases		
Identificador	TFGEQ_1911		
Tutor	Luca Sanminiatelli Salas		Baltasar Boix Rita
Día	12/6/19	Localización	Tarragona
Autora	Alba María Galve García		

1.1. Agradecimientos

Quiero agradecer el soporte recibido por parte de los dos tutores, el Sr. Baltasar Boix Rita y el Sr. Luca Sanminiatelli Salas por haberme guiado en la realización del proyecto. Resaltar también, la oportunidad que me ha ofrecido Repsol de desarrollar el trabajo de fin de grado en la compañía y la atención recibida por parte de los trabajadores.

1.2. Resumen

En la planta actual se encuentra el lavador de gases D-1002 encargado de absorber las trazas de monómeros procedentes en los venteos antes de enviarlos a la atmósfera. La Autorización Ambiental está en proceso de revisión y existe un riesgo de reducir estos Valores Límites provocando que D-1002 sea insuficiente para el tratamiento de venteos. Con tal de minimizar las emisiones a la atmósfera y trabajar dentro de los Valores Límites Establecidos (VLE's) se ha estudiado un proyecto nuevo e innovador.

El presente proyecto consiste en diseñar una nueva unidad de tratamiento de venteos capaz de absorber el estireno con mayor eficiencia que el actual y conectarlo en serie a D-1002. Éste estará formado por un lavador de gases, dos intercambiadores de calor tipo placas y una bomba de desplazamiento positivo.

Con la nueva alternativa se prevé que minimicen las emisiones de estireno en un 58% respecto las actuales. Por otro lado, se ha diseñado de tal forma que no genera ningún nuevo residuo, ya que el disolvente utilizado se alimenta a la reacción de producción de poliol polimérico. Además se podría minimizar el caudal de operación de agua en D-1002 reduciendo los costes de tratamiento de aguas residuales.

Este proyecto se trata de una inversión defensiva con un coste inicial de 1.6 M€ con el objetivo de no parar la producción de poliol polimérico. El tiempo de retorno de dicha inversión se daría en el

mismo año, siendo su vida útil de 15 años. Además, esta alternativa supondría un ahorro frente a la de un incinerador de llama directa de un Valor Actual Neto de 456 mil € calculado con un tipo de interés del 10% y una Tasa Interna de Retorno del 17%. Siendo el lavador de gases una alternativa más respetuosa con el medioambiente y que no genera gases de efecto invernadero

2. ETAPA PRELIMINAR

2.1. Definición y descripción del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de un nuevo *Scrubber* en la planta de polioles poliméricos de Repsol química Tarragona. El proceso de producción de Poliol Polimérico consta de: preparación de la solución vinílica, reacción, eliminación de monómeros no reaccionados, unidad de vacío y recuperación de monómeros. Todas los venteos procedentes de estas unidades y de los tanques de almacenamiento de materia prima están conectadas al lavador de gases con el objetivo de eliminar las trazas de estireno y acrilonitrilo en la corriente gaseosa (ver figura 2.1.).

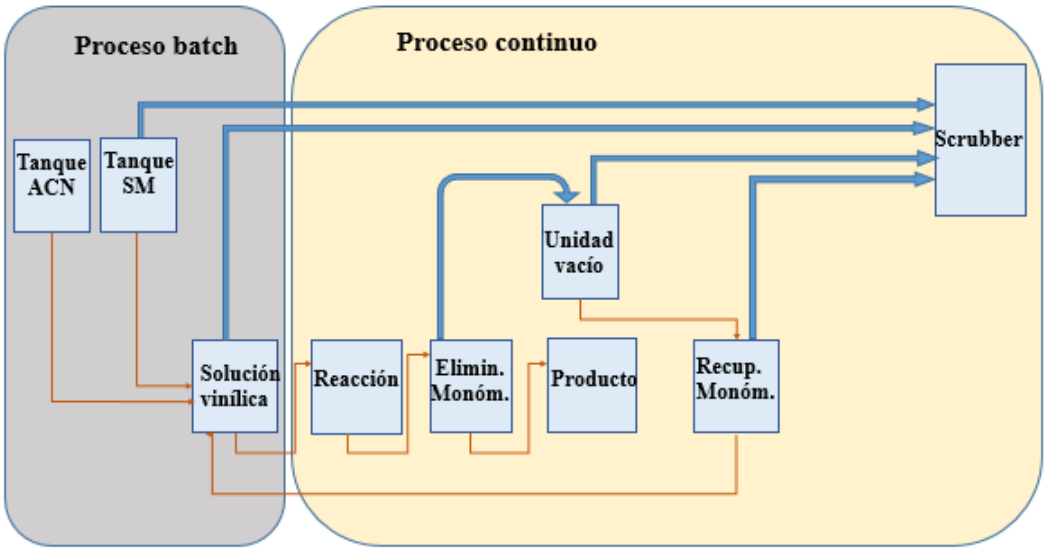


Figura 2.1. Esquema del proceso de Polioles Polimérico.

La estructura interna del nuevo lavador de gases D-1001 consta de una primera etapa de relleno y dos líneas de boquillas de pulverización en la parte superior de la torre por las cuales se atomizará el Poliol Flexible y así se conseguirá un buen contacto entre éste y la corriente gaseosa. Los venteos procedentes de las unidades de almacenamiento y eliminación de monómeros se inyectarán entre el relleno y las boquillas debido a la baja presión disponible. En cambio, los venteos procedentes de la etapa de solución vinílica se introducirán por la parte inferior de la torre (ver apartado 4.2.3).

El Poliol Flexible se hace pasar por el intercambiador E-1001 donde aumenta su temperatura hasta 50ºC antes de introducirse en el lavador de gases. En cuanto a la línea de descarga de D-1001, se encuentra la bomba G-1001A/B que se encarga de recircular el disolvente hacia la cabeza del *Scrubber* y asimismo cada dos horas impulsarlo hacia el tanque de solución vinílica, donde previamente se enfría a 20ºC en el intercambiador E-1002.

Debido a que el Poliol Flexible es retirado del lavador de gases cada dos horas, el propio *Scrubber* consta de un depósito de almacenamiento que se ha dimensionado en la parte inferior de éste.

2.2. Alcance del proyecto

La Autorización Ambiental (AA) del complejo industrial se encuentra en periodo de modificación siendo posible que disminuyan los valores límites establecidos para las emisiones de acrilonitrilo (ACN) y estireno (SM). Con el equipo actual, encargado de purificar las corrientes de nitrógeno, los valores de SM quedan en riesgo de que se encuentren por encima de los valores límite establecidos. Este hecho provoca que se haya de establecer una nueva alternativa con el objetivo de no sobrepasar los límites de emisiones en el caso de que sean reducidos.

En este proyecto se han planteado varias alternativas de las cuales se elegirá la más óptima para desarrollar su diseño y dimensionamiento de los equipos a implementar en la nueva instalación. Se han realizado los diagramas necesarios junto con una simulación en *Hysys* para poder desarrollar la ingeniería básica del proyecto. Con ello, se ha determinado la estrategia de control y el funcionamiento de la instalación. También se ha realizado el *layout* de la nueva alternativa para determinar la disposición de los equipos teniendo en cuenta su funcionamiento, distancias mínimas, circulación y seguridad.

Una vez acabada la etapa de ingeniería básica, se ha llevado a cabo un Análisis Cualitativo de Riesgo (AQR), en el que se ha determinado la peligrosidad del proceso. Se ha hecho uso de la metodología HAZOP (*Hazard and Operability*), que garantiza la seguridad de la instalación mediante un diseño de control y seguridad

El proyecto también incluye un análisis medioambiental en el que se ha determinado que los valores de las emisiones estén por debajo de los VLE's (Valores Límite Establecidos) determinados en el apartado 3.2. Se estudiarán los posibles residuos que generen la absorción de los monómeros y su tratamiento.

Finalmente en el estudio de la viabilidad económica del proyecto, se han determinado los costes de diseño, construcción y puesta en marcha. Al ser un proyecto de carácter necesario se ha comparado sus gastos con otra alternativa para ver cuál supondría una inversión inicial inferior.

Todas las tareas mencionadas se han planificado en un diagrama de GANTT, donde se ha establecido el tiempo de dedicación previsto para cada una de ellas. Esta herramienta permite realizar un seguimiento de control del progreso de cada una de las etapas para garantizar que el proyecto se pueda entregar en el periodo de tiempo establecido.

2.3. Antecedentes históricos

Se diseñó un lavador de gases para contener las emisiones de monómeros no reaccionados del proceso mediante su absorción en agua. El equipo consiste de una carcasa cilíndrica que contiene un relleno. En él, el líquido y el gas circulan a contracorriente con una amplia área de contacto entre ambos.

Inicialmente el equipo funcionaba con un reflujo, no obstante se descartó ya que las concentraciones de emisiones a la atmósfera incrementaban por la saturación de estireno en agua.

Actualmente el lavador de gases está operando sin reflujo obteniendo unas concentraciones por debajo de los valores límites establecidos para emisiones

2.4. Estudio de alternativas

Como se ha comentado anteriormente, el agua no es un buen disolvente del estireno. Para la elección del disolvente se tienen que tener en cuenta varios puntos, tanto técnicos como económicos. Los disolventes orgánicos para moléculas apolares son más caros pero a su vez más eficaces. Es por ello que se ha estimado el uso de Poliol Flexible para llevar a cabo la absorción. A continuación se han planteado una serie de propiedades que ha de tener un buen disolvente.

Tabla 2.1. Propiedades del disolvente.

Disolvente	**Agua**	**Poliol Flexible**
Solubilidad del gas	Baja solubilidad del soluto. Se necesitan grandes cantidades de agua para la absorción de estireno.	Alta solubilidad del soluto.
Volatilidad	P_{H2O}(20ºC)=0.023 bar a.	$P_{Poliol\ Flexible}$ (20ºC)=0 bar a.
Corrosividad	No	No
Coste	-Coste del disolvente no recuperado. -Coste del tratamiento de aguas residuales	No generaría coste ya que el poliol flexible con las trazas de monómero se recircularía como materia prima del proceso de polioles poliméricos al tanque de solución vinílica.

Disolvente	**Agua**	**Poliol Flexible**
Viscosidad	Viscosidad (25ºC)=0.89 cp	Viscosidad (25ºC)= 490 cp. Al tener alta viscosidad disminuye la rapidez de absorción y se producen más pérdidas de presión.
Toxicidad	No	No
Estabilidad química	Sí. No inflamable	Si, a condiciones normales. No inflamable
Punto de congelación	0ºC	Relativamente bajo

Como se puede observar, el poliol flexible cumple con las propiedades que ha de tener un buen disolvente a excepción de su viscosidad.

A continuación se plasma un esquema de las tres posibles configuraciones para la nueva instalación.

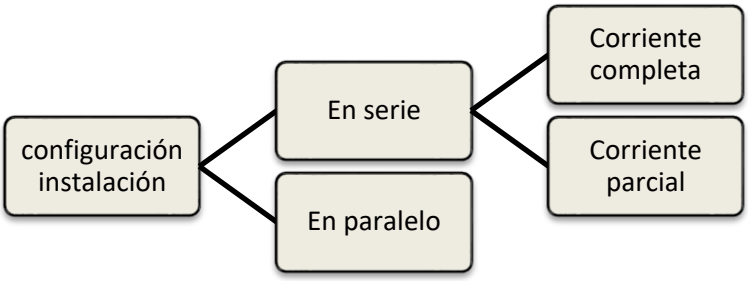


Figura 2.2. Esquema de las configuraciones de las alternativas.

2.4.1. Alternativa A: En serie, Corriente completa

Para esta alternativa todos los venteos de los equipos estarán conectados al nuevo *scrubber* en el que se producirá una primera absorción con poliol flexible. Posteriormente se enviarán al *scrubber* ya existente que funciona con agua.

2.4.2. Alternativa B: En serie, Corriente parcial

Esta alternativa consiste en dividir las corrientes según su concentración en monómeros de estireno. De manera que las líneas con mayor concentración de estireno se dirigirán hacia el nuevo *Scrubber* para que se produzca una primera absorción. La corriente gaseosa de salida del nuevo

lavador de gases se conectará con las líneas de menor concentración de estireno y se dirigirán hacia el *Scrubber* actual para su absorción con agua.

Para determinar que corrientes son las que contienen más monómeros de estireno se ha realizado un estudio medioambiental que se puede ver en el apartado 6.1.Emisiones.

2.4.3. Alternativa C: En paralelo

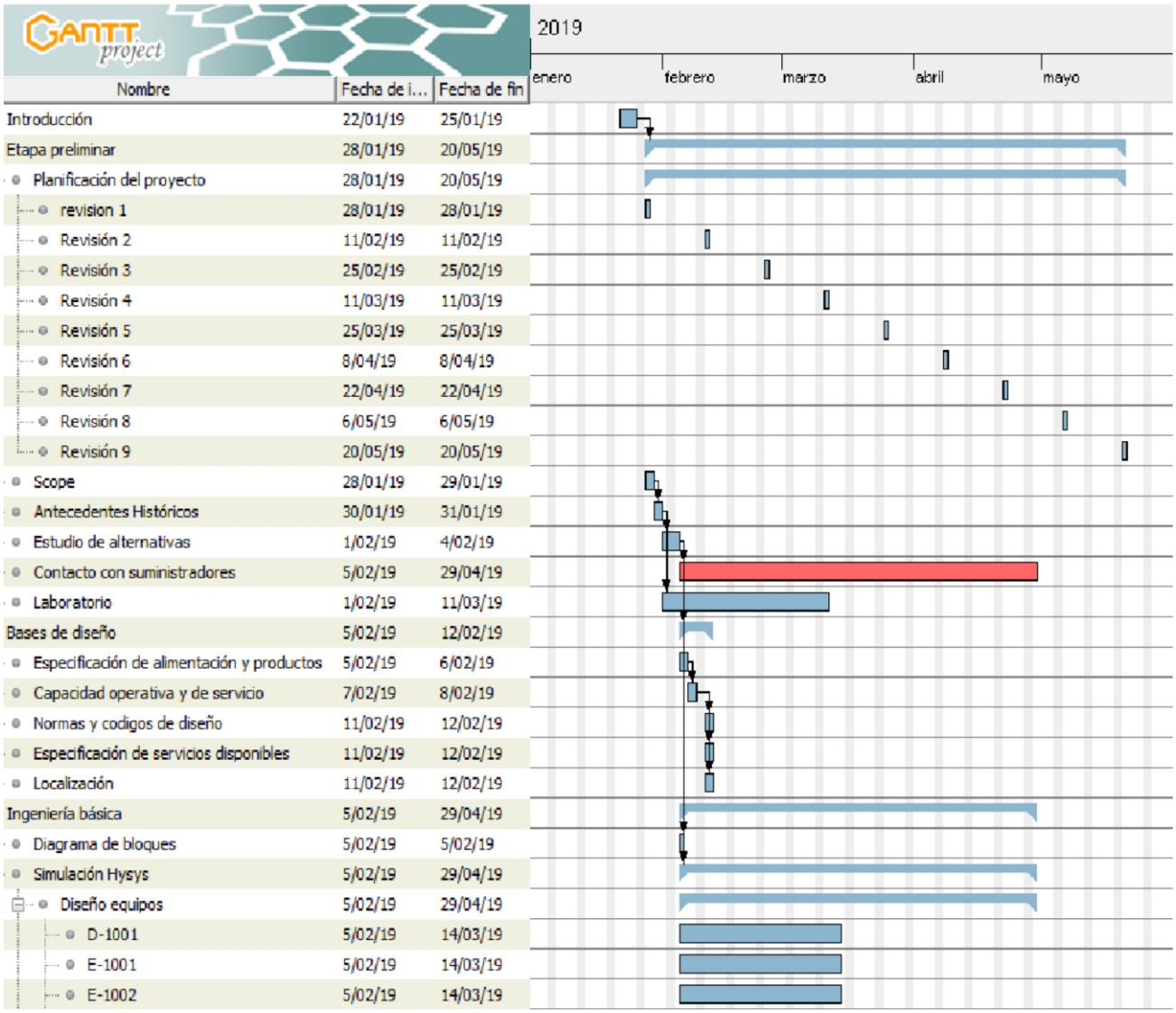
En esta propuesta, la división de corrientes se hace exactamente igual que en la alternativa B. La única diferencia es que las emisiones del nuevo *scrubber* se dirigirán directamente a la atmósfera sin pasar por el *scrubber* actual.

2.5. Planificación del proyecto

En este apartado se presenta la planificación para el desarrollo del proyecto haciendo uso de la técnica del diagrama de Gantt. Donde se representan las tareas a realizar indicando su duración en el tiempo. Las tareas en color rojo son las consideradas críticas ya que en caso de que se entreguen después de la fecha fijada, retrasarán las siguientes.

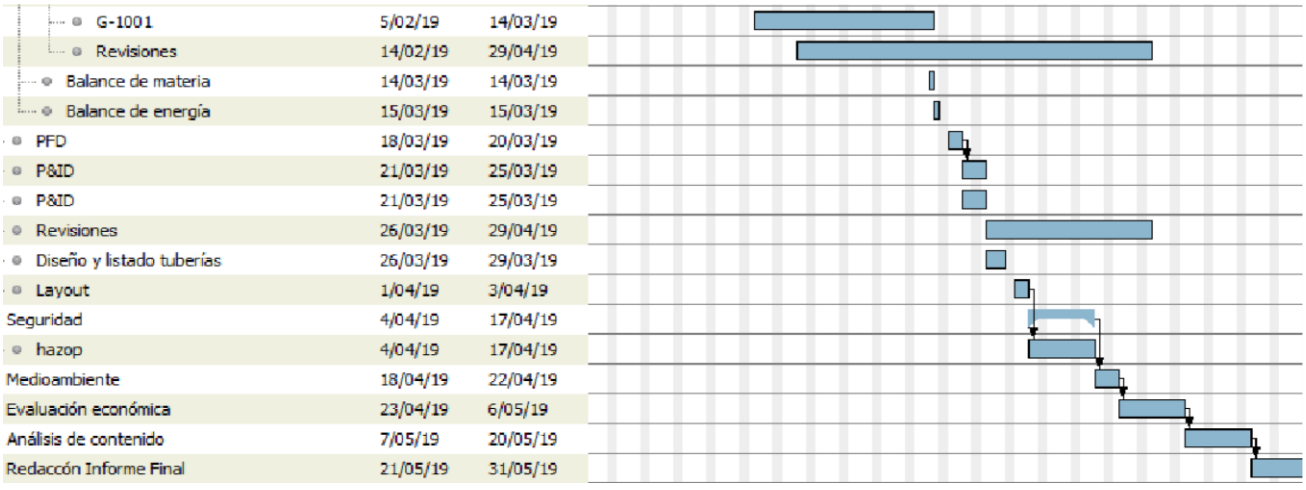
Esta planificación ha ido modificada a medida que se ha ido avanzando el proyecto debido a variaciones en los tiempos de realización de las tareas. En el anexo A.1 se encuentra la primera versión del diagrama de Gantt.

La versión final del diagrama de Gantt se diferencia de la inicial básicamente en que se ha aumentado el tiempo de contacto con los suministradores ya que ha sido un proceso lento. Por otro lado también se ha concretado sobre el diseño de equipos en esta última versión, abriendo además un periodo de revisiones. Para las tareas restantes, se han seguido los tiempos previstos, entregando el proyecto en la fecha establecida.



Nombre	Fecha de i...	Fecha de fin
Introducción	22/01/19	25/01/19
Etapa preliminar	28/01/19	20/05/19
Planificación del proyecto	28/01/19	20/05/19
revision 1	28/01/19	28/01/19
Revisión 2	11/02/19	11/02/19
Revisión 3	25/02/19	25/02/19
Revisión 4	11/03/19	11/03/19
Revisión 5	25/03/19	25/03/19
Revisión 6	8/04/19	8/04/19
Revisión 7	22/04/19	22/04/19
Revisión 8	6/05/19	6/05/19
Revisión 9	20/05/19	20/05/19
Scope	28/01/19	29/01/19
Antecedentes Históricos	30/01/19	31/01/19
Estudio de alternativas	1/02/19	4/02/19
Contacto con suministradores	5/02/19	29/04/19
Laboratorio	1/02/19	11/03/19
Bases de diseño	5/02/19	12/02/19
Especificación de alimentación y productos	5/02/19	6/02/19
Capacidad operativa y de servicio	7/02/19	8/02/19
Normas y codigos de diseño	11/02/19	12/02/19
Especificación de servicios disponibles	11/02/19	12/02/19
Localización	11/02/19	12/02/19
Ingeniería básica	5/02/19	29/04/19
Diagrama de bloques	5/02/19	5/02/19
Simulación Hysys	5/02/19	29/04/19
Diseño equipos	5/02/19	29/04/19
D-1001	5/02/19	14/03/19
E-1001	5/02/19	14/03/19
E-1002	5/02/19	14/03/19

Figura 2.3. Diagrama de Gantt del proyecto.



G-1001	5/02/19	14/03/19
Revisiones	14/02/19	29/04/19
Balance de materia	14/03/19	14/03/19
Balance de energía	15/03/19	15/03/19
PFD	18/03/19	20/03/19
P&ID	21/03/19	25/03/19
P&ID	21/03/19	25/03/19
Revisiones	26/03/19	29/04/19
Diseño y listado tuberías	26/03/19	29/03/19
Layout	1/04/19	3/04/19
Seguridad	4/04/19	17/04/19
hazop	4/04/19	17/04/19
Medioambiente	18/04/19	22/04/19
Evaluación económica	23/04/19	6/05/19
Análisis de contenido	7/05/19	20/05/19
Redaccón Informe Final	21/05/19	31/05/19

Figura 2.4. Continuación del diagrama de Gantt del proyecto.

2.6. Contacto con suministradores

Con tal de concretar la configuración del lavador de gases, se ha mantenido conversaciones con una serie de suministradores. En primer lugar con la compañía Spraying System, los cuales son especialistas en boquillas de pulverización, que después de intercambiar varios correos concretaron que por su parte era viable inyectar el Poliol Flexible a 50ºC mediante el uso de sus boquillas Whirljet tipo BX (ver anexo A.2.2). En segundo lugar se contactó con la compañía SULZER especialistas en estructuras interna de columnas. Ellos realizaron un análisis detallado y especificaron que sería posible a pesar de que la eficiencia del relleno sería muy baja debido a la alta viscosidad del disolvente. En el anexo A.2.1 se puede ver el diseño preliminar del relleno

2.7. Laboratorio

Se ha realizado un experimento en el laboratorio para complementar las propiedades del poliol flexible en *Hysys* y observar si efectivamente es un buen disolvente para el estireno. Como se puede observar en la figura 2.5 el experimento consistió en burbujear una corriente de nitrógeno dentro de un vaso lavador de estireno. La corriente de nitrógeno saturada se hace burbujear en el segundo vaso lavador, el cual contenía poliol flexible. Finalmente el gas estaba conectado a un tercer vaso lavador con poliol flexible para terminar de absorber los restos de estireno que no se habían disuelto en el segundo.

El experimento se ha realizado en dos partes para observar el efecto de la temperatura en la absorción de estireno. En el primer experimento todos los frascos se encontraban a temperatura amiente, mientras que en el segundo experimento el primer frasco lavador de poliol flexible se había calentado a 40ºC.

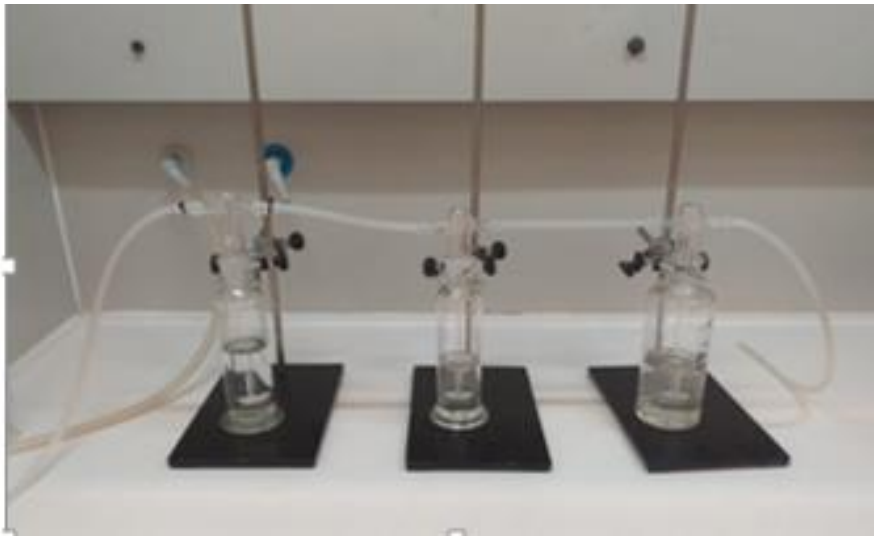


Figura 2.5. Esquema de experimento a temperatura ambiente.

El riesgo existente en este experimento se debe a que el estireno es un producto inflamable, que puede ser mortal en caso de ingestión o penetración por las vías respiratorias. La realización de la prueba se hizo en una campana extractora en marcha y con la vitrina bajada. También se precisó el uso de gafas protectoras y guantes para su manipulación. El experimento es en continuo y se supervisó en todo momento.

2.7.1. Desarrollo experimental

Material necesario:

- 3 frascos lavadores de gas con tubo pescante para borboteo tipo respirometría.
- Soportes, aro, nueces y pinzas.
- Balanza.
- Pipetas Pasteur de plástico.
- Viales para análisis cromatográfico posterior.
- Cromatógrafo.
- 1 Placa calefactora
- 1 Termómetro

Compuestos:

Las muestras se tomaron, etiquetaron y se mantuvieron cerradas en una vitrina extractora hasta la realización del experimento.

- Corriente de nitrógeno.
- 200 g de SM del depósito D4221.
- 800 g de poliol flexible del depósito de venta.

Procedimiento a seguir:

- Pesar los vasos lavadores vacíos y anotar
- Llenar el vaso lavador 1 con 180 g de SM
- Llenar el vaso lavador 2 con 100 g de poliol flexible
- Llenar el vaso lavador 3 con 200 g de poliol flexible
- Pesar y anotar la cantidad inicial de todas las muestras.
- Acoplar las diferentes piezas del montaje de absorción.
- Encender la placa calefactora del vaso lavador 2. Esperar hasta alcanzar la temperatura deseada de 40ºC. Anotar la temperatura. (Solo para el experimento 2)
- Abrir la entrada de nitrógeno. Esperar 20min. Parar borboteo, medir temperatura (experimento 2), pesar los viales vacíos y apuntar. Tomar y pesar muestras del lavador 2 y 3. Repetir cinco veces.
- Pesar los vasos lavadores y anotar.
- Gestionar los residuos como producto orgánico.

Las muestras a analizar para cada uno de los experimentos deberán pesarse y etiquetarse. Se analizará el contenido de SM para muestras orgánicas con el MA-15-3041.

2.7.2. Resultados

2.7.2.1. Experimento 1: A temperatura ambiente

En primer lugar en las tablas 2.2 y 2.3 se realiza un balance de materia global para evaluar las pérdidas de masa en los frascos lavadores y las muestras extraídas.

Tabla 1.2. Balance de masas de los vasos lavadores.

Vaso lavador	Contenido	Masa inicial (g)	Masa final (g)
1	Estireno	143.6	138.3
2	Poliol Flexible	106.4	71.70
3	Poliol Flexible	236.7	194.1
Total		486.7	404.1

Tabla 2.3. Masa de las muestras de los vasos lavadores en el tiempo.

Tiempo muestra (min)	Vaso lavador 2 (g)	Vaso lavador 3 (g)
20	4.018	4.022
40	4.033	4.014
60	4.009	4.010
80	4.015	4.012
100	4.010	4.008
120	4.004	4.014
Total	24.08	24.08

Balance de materia global:

$$\frac{404.1+24.08+24.08}{486.7} = 0.93\ \%$$ Ec. (2.1.)

El caudal de nitrógeno marcado por el rotámetro usado en el experimento se ha mantenido constante.

Según los datos de la tabla 2.2, el estireno eliminado del frasco 1 ha sido de 5.3 g, por lo tanto el caudal enviado de estireno al frasco lavador 2 es de 2.65g/h.

A continuación se presentan los datos obtenidos en el análisis cromatográfico de las muestras recogidas de los vasos 2 y3.

Tabla 2.4.Analítica muestras del frasco lavador 2.

Nombre muestra	**Masa muestra (g)**	**Concentración estireno (ppm)**	**Promedio (ppm)**	**Masa estireno (g)**
20F1A	2.009	5561	5517	0.022
20F1B	2.009	5474		
40F1A	2.017	10790	10810	0.04360
40F1B	2.016	10840		
60F1A	2.008	17150	17090	0.06850
60FAB	2.000	17030		
80F1A	2.002	22630	22910	0.09200
80F1B	2.013	23190		
100F1A	2.003	30190	30370	0.1218
100F1B	2.008	30550		
120F1A	2.004	37130	37330	0.1495
120F1B	2.000	37520		

Tabla 2.5. Analítica muestras del frasco lavador 3.

Nombre muestra	**Masa muestra (g)**	**Concentración estireno (ppm)**	**Promedio (ppm)**	**Masa estireno (g)**
20F2A	2.022	84.78	84.48	$3.397 \cdot 10^{-4}$
20F2B	2.000	84.18		
40F2A	2.009	226.4	224.2	$8.999 \cdot 10^{-4}1$
40F2B	2.005	22.01		
60F2A	2.000	403.4	404.9	$1.623 \cdot 10^{-4}$
60F2B	2.009	406.4		
80F2A	2.010	644.7	641.8	$2.582 \cdot 10^{-4}$
80F2B	2.002	638.8		
100F2A	2.005	987.7	982.5	$3.938 \cdot 10^{-4}$
100F2B	2.003	977.2		
120F2A	2.008	1409	1409	$5.650 \cdot 10^{-3}$
120F2B	2.006	1408		

Tabla 2.6. Balance de estireno.

Vaso lavador	Estireno inicial (g)	Estireno Final (g)
1	413.6	138.3
2	0	2.676
3	0	0.2735
Muestras	0	0.5126
Total	143.6	141.8

Balance de materia de estireno:

$$\frac{141.8}{143.6}=0.99\% \qquad \text{Ec. (2.2)}$$

A pesar de que el método analítico utilizado es muy preciso, a su vez es poco exacto debido a que está calibrado para concentraciones muy inferiores que las que se han analizado en este experimento, el balance de materia de estireno ha cerrado con un valor bastante alto.

2.7.2.2. Experimento 2: A 40ºC

En primer lugar se realiza un balance de materia global para evaluar las pérdidas de masa en los frascos lavadores y las muestras extraídas.

Tabla 2.7. Balance de masas de los vasos lavadores.

Vaso lavador	Contenido	Masa inicial	Masa final
1	Estireno	138.3	132.9
2	Poliol Flexible	100.5	54.90
3	Poliol Flexible	235.1	181.1
Total		473.9	368.9

Tabla 2.8. Muestras de los vasos lavadores en función del tiempo.

Tiempo muestra (min)	Vaso lavador 2 (g)	Vaso lavador 3 (g)
5	5.2	7.0
10	5.7	6.1
20	5.1	5.3
40	5.4	5.4
60	6.1	5.1

Tiempo muestra (min)	Vaso lavador 2 (g)	Vaso lavador 3 (g)
80	5.9	5.0
100	5.1	6.1
120	5.5	6.8
Total	44	47

Balance de materia global:

$$\frac{368.9+44+46.8}{473.9} = 0.97\ \%$$ Ec. (2.3.)

El caudal de nitrógeno marcado por el rotámetro usado en el experimento se ha mantenido constante.

Según con los datos de la tabla 2.7, el estireno eliminado del frasco 1 ha sido de 5.4 g, por lo tanto el caudal enviado de estireno al frasco lavador 2 es de 2.7g/h.

A continuación se presentan los datos obtenidos en el análisis cromatográfico de las muestras recogidas de los vasos 2 y3.

Tabla 2.9. Analítica muestras del frasco lavador 2.

Nombre muestra	Masa muestra (g)	Concentración estireno (ppm)	Promedio (ppm)	Masa estireno (g)
5F1A	2.022	2553	2556	$1.029 \cdot 10^{-2}$
5F1B	2.006	2558		
10F1A	2.003	4195	4239	$1.704 \cdot 10^{-2}$
10F1B	2.017	4283		
20F1A	2.008	7386	7340	$2.945 \cdot 10^{-2}$
20FAB	2.005	7293		
40F1A	2.016	11550	11530	$4.638 \cdot 10^{-2}$
40F1B	2.008	11500		
60F1A	2.011	17440	17450	$7.007 \cdot 10^{-2}$
60F1B	2.004	17470		
80F1A	2.012	27160	26770	$1.076 \cdot 10^{-1}$
80F1B	2.007	26380		
100F1A	2.005	33130	33040	$1.326 \cdot 10^{-1}$
100F1B	2.007	32950		

Nombre muestra	Masa muestra (g)	Concentración estireno (ppm)	Promedio (ppm)	Masa estireno (g)
120F1A	2.017	40590	40540	$1.629 \cdot 10^{-1}$
120F1B	2.002	40490		

Tabla 2.10. Analítica muestras del frasco lavador 3.

Nombre muestra	Masa muestra (g)	Concentración estireno (ppm)	Promedio (ppm)	Masa estireno (g)
5F2A	2.005	55.76	55.63	$2.228 \cdot 10^{-4}$
5F2B	2.001	55.51		
10F2A	2.010	85.47	85.54	$3.441 \cdot 10^{-4}$
10F2B	2.013	85.61		
20F2A	2.010	170.0	170.5	$6.839 \cdot 10^{-4}$
20F2B	2.001	170.9		
40F2A	2.009	320.7	322.1	$1.294 \cdot 10^{-3}$
40F2B	2.002	323.5		
60F2A	2.006	671.8	671.1	$2.690 \cdot 10^{-3}$
60F2B	2.003	670.3		
80F2A	2.011	1308	1307	$5.247 \cdot 10^{-3}$
80F2B	2.001	1307		
100F2A	2.004	2011	2023	$8.109 \cdot 10^{-3}$
100F2B	2.007	2034		
120F2A	2.008	3135	3118	$1.251 \cdot 10^{-2}$
120F2B	2.005	3201		

Una vez obtenidos los resultados del cromatógrafo se procede a hacer el cálculo del balance de estireno presente en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Balance de estireno.

Vaso lavador	Estireno inicial (g)	Estireno Final (g)
1	438.3	132.9
2	0	2.225
3	0	0.5647

Muestras	0	0.6073
Total	138.3	136.3

Balance de materia de estireno:

$\frac{136.3}{138.3}$=0.99% Ec. (2.4.)

Como se ha dicho anteriormente el método analítico utilizado es poco exacto. No obstante el balance de materia de estireno ha cerrado con un valor alto.

A continuación se han representado los resultados de la concentración de estireno de ambos frascos lavadores en función del tiempo y se han comparado los dos experimentos realizados.

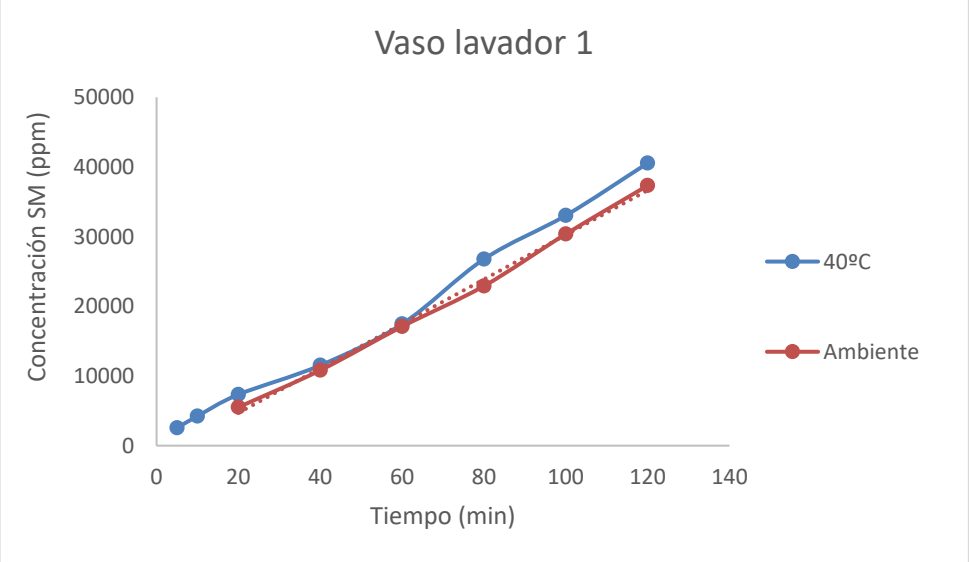


Figura 2.6. Concentración de estireno en función del tiempo del vaso lavador 1 a ambas temperaturas.

De los datos obtenidos de los experimentos se ha podido estimar un valor de variación de concentración en la transferencia de SM en Poliol Flexible y de ahí el coeficiente de transferencia de masa (K_La) entre el SM y el F5511 (ver tabla 2.12) mediante la siguiente ecuación:

$\frac{dC}{dt} = K_La \cdot (C_S - C)$ Ec. (2.5)

Como el estireno es totalmente soluble en el poliol flexible mientras que la solubilidad del estireno en el nitrógeno es relativamente baja, se ha considerado que el valor $(C_S - C)$ tiende a 1.

Tabla 2.12. Estimación de la solubilidad del estireno en poliol flexible para ambos experimentos.

Experimento	**SM en Poliol Flexible (ppm/min)**	**SM en Poliol Flexible por segundo (g/g)**	**K_La (s^{-1})**
1 (T = ambiente)	31.2	$5.2 \cdot 10^{-7}$	0.53
2 (T= 40ºC)	38.8	$6.5 \cdot 10^{-7}$	0.65

2.7.3. Conclusión

Como se puede observar en la figura 2.6, las concentraciones de estireno en el frasco lavador 2 son prácticamente idénticas a ambas temperaturas. Esto supone que sea una buena opción calentar el Poliol flexible hasta 40ªC debido a que bajaría la viscosidad del disolvente sin disminuir la absorción del Estireno.

Por otro lado, anteriormente en el complejo de Repsol Química Tarragona se había realizado un experimento similar en el que se estudiaba la absorción de estireno en agua. La absorción de estireno en 200g de agua durante 100 min dio un valor de 200ppm aproximadamente, demostrando que el agua absorbe 93% menos el estireno que el poliol flexible. Además se observó cómo a partir de ahí se producía el fenómeno de desorción, llegando a una concentración de 10ppm. Dichos datos corroboran que el poliol flexible se trata de un mejor disolvente para el estireno.

3. BASES DE DISEÑO PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

En este apartado se establecen las bases de diseño para el posterior desarrollo del proyecto.

3.1. Especificación de las alimentaciones

Las corrientes de alimentación al *Scrubber* están constituidas mayoritariamente de nitrógeno con trazas de estireno (SM), acrilonitrilo (ACN) y oxido de propileno (OP) que han sido arrastradas del proceso de polioles poliméricos. Las especificaciones de las materias primas del proceso se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Especificaciones de los compuestos (Ref. 1).

Producto	**Riqueza**	**Aspecto**
Estireno Monómero	99.8% peso mín.	Líquido claro, libre de impurezas
Acrilonitrilo	99,4 % peso mín	-
Óxido de propileno	99.8% peso mín.	Líquido transparente

En la tabla 3.2 se muestran las condiciones de presión y temperatura de las corrientes de alimentación al *Scrubber* D-1001.

Tabla 3.2. Condiciones de las corrientes de alimentación a D-1001.

Corrientes alimentación D-1001	**Presión (g/cm^2g)**	**Temperatura (ºC)**
Tanque SM	20	Ambiente
Eliminación monómeros	60	Ambiente
Solución vinílica	7000	Ambiente
Tanque Poliol Flexible	4100	Ambiente

A continuación se han plasmado tanto los valores límites de exposición como las propiedades físicas y químicas para cada uno de los compuestos.

Tabla 3.3. Propiedades del estireno según la ficha interna de seguridad (Ref. 2).

Propiedad	**Valor**	**Unidad**
Peso molecular	104.16	g/mol
Densidad relativa	0.91	g/cm^3
Punto inflamación	31	ºC

Propiedad	Valor	Unidad
Punto ebullición	145	ºC
Punto fusión	-31	ºC
Solubilidad en agua (25ºC)	0.03	% (p/p)
Temperatura auto ignición	490	ºC
INSHT (España)	VLA-ED: 20	Ppm
	VLA-EC:40	

Tabla. 3.4. Propiedades del acrilonitrilo según la ficha interna de seguridad (Ref. 3).

Propiedad	Valor	Unidad
Peso molecular	53.06	g/mol
Densidad relativa	0.806	g/cm^3
Punto inflamación	-4.99	ºC
Punto ebullición	77	ºC
Punto fusión	-83	ºC
Solubilidad en agua	Soluble	% (p/p)
Presión de vapor (20ºC)	86	mmHg
INSHT (España)	VLA-ED: 2	Ppm
	VLA-EC: -	

Tabla 3.5. Propiedades del óxido de propileno según la ficha interna de seguridad (Ref. 4).

Propiedad	Valor	Unidad
Peso molecular	58.08	g/mol
Densidad relativa	0.8	g/cm^3
Punto inflamación	-37	ºC
Punto ebullición	34	ºC
Punto fusión	-112	ºC
Solubilidad en agua	405	g/l
Temperatura auto ignición	430	ºC
Presión de vapor	0.6	Bar
INSHT (España)	VLA-ED: 5	mg/m^3
	VLA-EC:170	

El flujo y concentración del caudal de entrada al *scrubber* es variable. No obstante se ha fijado un caudal y fracciones másicas máximas para poder tratar el proyecto como un estado estacionario. En la siguiente tabla se muestran los valores fijados para dicha corriente y las condiciones a las que se encuentra.

Tabla 3.6. Condiciones y composiciones de la corriente de alimentación.

Parámetro	**Valor**	**Unidad**
Presión	2	Bar
Temperatura	20	ºC
Caudal	1270	Kg/h
Estireno	0.007	Fracción másica
Acrilonitrilo	0.0293	Fracción másica
Nitrógeno	0.967	Fracción másica

Como se puede observar no se ha tenido en cuenta el óxido de propileno ya que es prácticamente cero.

3.2. Especificación de la corriente de emisiones a la atmósfera

Las emisiones de salida a la atmósfera una vez hayan recibido el tratamiento mediante ambos *scrubbers*, tendrán que cumplir los nuevos Valores Límites Establecidos por la Autorización Ambiental. Estos valores no se pueden proporcionar por confidencialidad.

3.3. Capacidad operativa y factor de servicio

Los datos de diseño de la planta de polioles poliméricos son los siguientes:

- Capacidad operativa: 25000 t/año
- Factor de operación de la planta: 8000 horas/año

3.4. Normas y códigos de diseño

Para el cálculo, selección de materiales, diseño y construcción de los equipos a presión en esta instalación, se ha hecho server el código ASME sección VIII división 1: *Recipientes a presión,* ASME sección I y ASME sección VIII división 2, junto con la normativa de la directiva europea (2014/68/EU) obligatoria para todos los países miembros de la unión europea. Por otro lado, también se ha tenido en cuenta La directiva de emisiones Industriales (2010/75/EU).

3.5. Especificaciones de los servicios disponibles

Seguidamente se expondrán las diversas *utilities* que requerirá la terminal (Ref. 1).

3.5.1. Condensado

Los condensados son recuperados del vapor de alta presión tal y como se explica en los siguientes apartados (3.5.1.1-3.5.2.4), A continuación se presenta la tabla 3.7 con las características del vapor de condensación.

Tabla 3.7. Características del vapor de condensación.

Características	**Valor**	**Unidad**
Coeficiente ensuciamiento	0.0001	ºC h m^2/Kcal.
Fe	< 0,02	Ppm
Cu	< 0,003	Ppm
Na +K	< 0,01	Ppm
SiO_2	< 0,02	Ppm
Conductividad	< 0,2	µS/cm

3.5.1.1. Condensado de alta presión

Procede del Sistema de Vapor de 38.5 kg/cm^2r de presión, descarga al sistema de presión de 18.0 kg/cm^2 r a través de un recipiente flash.

3.5.1.2. Condensado de media presión

Procede del Sistema de Vapor de 18.0 kg/cm^2r de presión, descarga al sistema de presión de 5.0 kg/cm^2 r a través de un recipiente flash.

3.5.1.3. Condensado de baja presión

Procede del Sistema de Vapor de 5.0 kg/cm2r de presión, descarga al sistema de presión de 1.8 kg/cm^2 r a través de un recipiente flash. El condensado procedente de este flash se enviará al límite de batería de la Planta, a una presión de 6 kg/cm^2r para enviarlo directamente al desgasificador.

3.5.1.4. Condensado de muy baja presión

Baja procede del Sistema de Vapor de 1.8 Kg/cm^{2}r de presión, se recogerá en un recipiente atmosférico dentro del límite de batería de la Planta del cual se enviará a 6,5 Kg/cm^{2}r directamente al desgasificador.

3.5.2. Agua de refrigeración

En la tabla presentada a continuación se presenta la descripción del servicio de agua de refrigeración y agua bruta.

Tabla 3.8. Descripción del agua de refrigeración y bruta de la instalación.

Descripción	**Agua refrigeración**	**Agua bruta**
Suministro desde	Torre	Tanque
Retorno a	Torre	-
Presión de suministro (kg/cm^2 r)	4.5	7
Presión de retorno (kg/cm^2 r)	3	-
Máx. ΔP disponible en intercambiadores (kg/cm^2)	0.7	-
Presión Diseño sistema (kg/cm^2 g)	8	12
ºC Suministro	30	-
ºC máx. Retorno	40	-

3.5.3. Energía eléctrica

En la tabla 3.9 se muestran las características de la energía eléctrica utilizada en la planta de Repsol Química Tarragona.

Tabla 3.9. Características de la energía eléctrica.

Servicio	**Potencia (kW)**	**Voltaje**	**Fases**	**Frec-hz**
Motores	Hasta 160	380	3	50
Motores	Desde 160	6.300	3	50
Instrumentos	-	220	1	50
Alumbrado	-	220	2	50
Suministro a planta	-	6300	3	50

3.5.4. Nitrógeno

Este servicio se suministra a través de un colector procedente a una fuente externa ajena al complejo de Repsol Química. Esta *utilitie* se desglosa en red de alta y baja presión como se observa en las tablas que se encuentran a continuación

Tabla 3.10. Condiciones de la corriente de nitrógeno para la red de alta presión.

Propiedades	**Mínimo**	**Normal**	**Diseño**
Temperatura ºC	-	Ambiente	60
Presión (kg/cm^2r)	-	15	40

Tabla 3.11. Condiciones de la corriente de nitrógeno para la red de baja presión.

Propiedades	**Mínimo**	**Normal**	**Diseño**
Temperatura ºC	-	Ambiente	60
Presión (kg/cm^2r)	-	7	10

Tabla 3.12. Propiedades de la corriente de nitrógeno.

Propiedades	**Valor**	**Unidad**
Pureza	99.9	% vol
Contenido O_2	10	Ppm vol
Contenido CO	1	Ppm vol
Contenido CO_2	2	Ppm vol
Punto de rocío (atm)	-40	ºC

3.5.5. Aire

En la tabla 3.13 se especifican las propiedades del aire utilizado en válvulas instrumentos i equipos de la instalación.

Tabla 3.13. Propiedades del aire de instrumentación.

Propiedad	**Aire de planta**	**Aire instrumentación**	**Unidad**
Presión del sistema	7	5/7	Kg/cm^2r
Capacidad disponible	650	2350	Nm^3/hr
Pto. Rocío requerido	-	-30	ºC
Presión diseño	10	10	Kg/cm^2r

Temperatura diseño	65	65	ºC

3.5.6. Localización

La planta de polioles poliméricos se encuentra en el complejo de Repsol Química Tarragona, en el polígono industrial del Morell. En la figura siguiente se muestra tanto la situación geográfica de la planta como la disposición de donde se colocaría el nuevo lavador de gases.

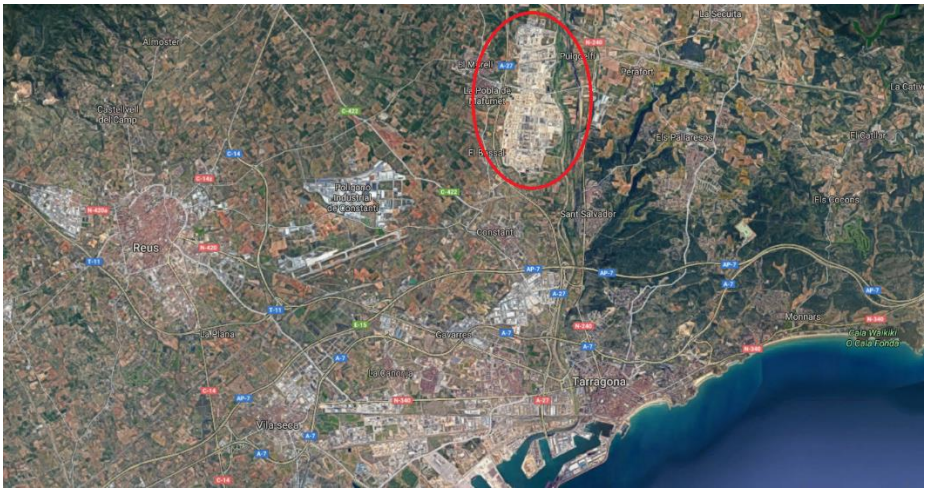


Figura 3.1. Mapa de la localización geográfica del complejo Repsol Química Tarragona.

Figura 3.2. Disposición del nuevo equipo.

4. DESARROLLO DE LA INGENIERÍA BÁSICA DEL PROYECTO

4.1. Simulación de la instalación en *Hysys*

Con tal de estimar qué alternativa (ver apartado 2.4) puede ser la más viable, se han realizado unas simulaciones preliminares para cada una de ellas. El objetivo por lo tanto es obtener una alternativa cuyas emisiones se encuentren por debajo de los valores límites establecidos y que los costes tanto de proyecto como los variables (energía necesaria) sean mínimos. Para ello se han ido planteando y descartando una serie de hipótesis en función de los resultados obtenidos en *Hysys*

4.1.1. Corrientes de entrada al *Scrubber* actual D-1002

Solo se toman medidas de las concentraciones y flujos a la salida del *Scrubber*, esto hace que no se conozcan cuáles son los valores a la entrada. Por tanto, para poder hacer una buena aproximación de la corriente de entrada, se ha simulado el *Scrubber* actual basándose en su hoja de especificación y se han ido variando únicamente los valores de la corriente de venteos a la entrada hasta que se ha obtenido las emisiones actuales.

Como se verá más detalladamente en el apartado 6.1. Emisiones, se producen continuamente venteos hacia el *Scrubber*, pero sus flujos y concentraciones varían formando una tendencia que se puede dividir en cuatro etapas.

Para llevar a cabo dicha simulación, se extrajeron los valores minutales de las emisiones a la atmósfera para el equipo actual haciendo uso de *Aspen Process Explorer*. De ahí se han realizado medias horarias móviles y se ha seleccionado las más desfavorables.

Una vez conocidos los valores de los venteos de entrada a través de la simulación del *Scrubber* actual, se ha podido llevar a cabo la simulación de las diferentes alternativas.

4.1.2. Estudio de los parámetros de la nueva instalación

A continuación se presentan las restricciones y los parámetros que se han decidido optimizar a lo largo de este proceso para cada una de las configuraciones anteriores

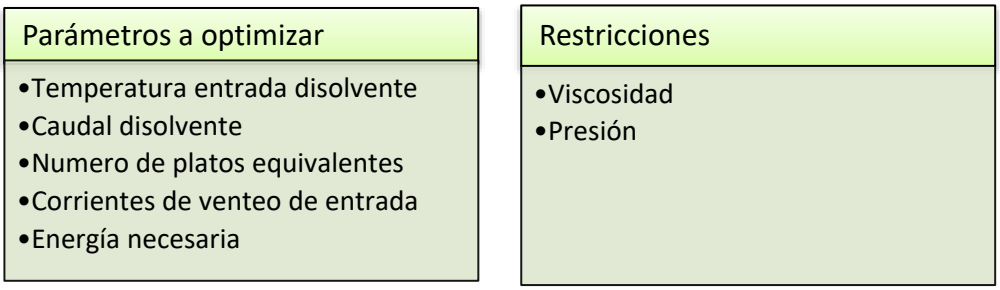


Figura 4.1. Parámetros a optimizar y restricciones.

4.1.2.1. Restricciones

4.1.2.1.1. Viscosidad

La viscosidad es una característica propia del disolvente que expresa la facilidad que tiene éste para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. En el caso del poliol flexible es un producto altamente viscoso y esto genera unas pérdidas de presión importantes a la hora de transportarlo por tuberías o equipos. Esta propiedad está sujeta a la temperatura de operación tal como muestra la figura 4.2. Los suministradores por lo tanto proporcionarán una viscosidad máxima para la que el equipo pueda funcionar.

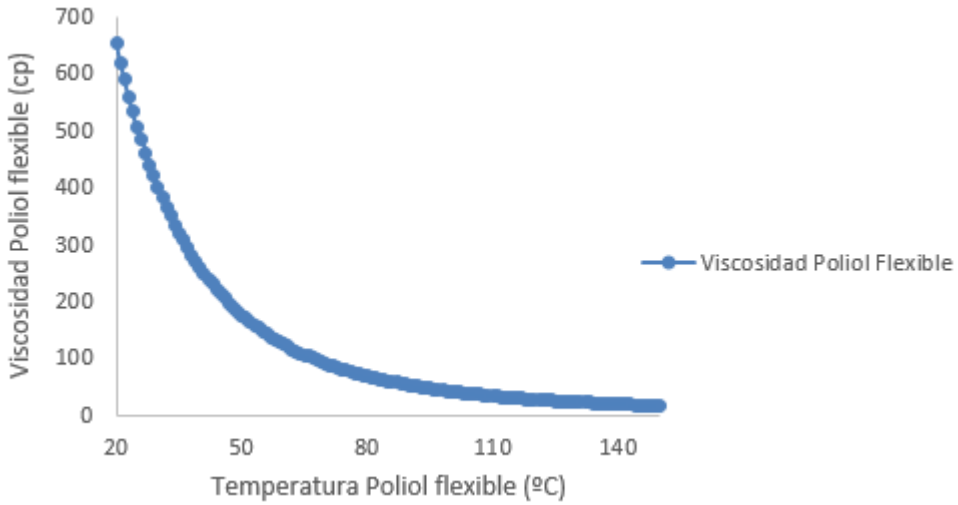


Figura 4.2. Variación de la viscosidad del Poliol Flexible según la temperatura.

4.1.2.1.2. Presión

Se ha observado que al aumentar o disminuir la presión de operación del nuevo *scrubber* los ppm de monómeros no absorbidos son prácticamente constantes.

4.1.2.2. Parámetros a optimizar

Se han realizado diferentes gráficos para tener una primera aproximación general de la tendencia que sigue las fracciones másicas en la corriente de emisiones a la atmósfera en función de la temperatura y caudal de disolvente. Posteriormente se realizarán específicamente para cada alternativa.

4.1.2.2.1. Temperatura

El estudio de la absorción de estireno y poliol flexible en función de la temperatura se ha plasmado en la figura 4.3 mediante la cual se podrá determinar que temperatura sería la óptima para la

instalación. Como se observa, ambos compuestos siguen una tendencia parabólica. Para el caso del acrilonitrilo usar poliol flexible como disolvente es bastante desfavorable debido a que para una buena absorción, el disolvente tendría que estar por debajo de la temperatura ambiente o pasados los 200ºC. Por otro lado, en el caso del estireno, se produce una buena absorción hasta alcanzar una temperatura de 40ºC dónde a partir de esta aumentarían las emisiones hasta llegar los 200ºC que volverían a disminuir.

Calentar el disolvente hasta 200ºC se ha descartado ya que supondría un gran coste energético a la instalación.

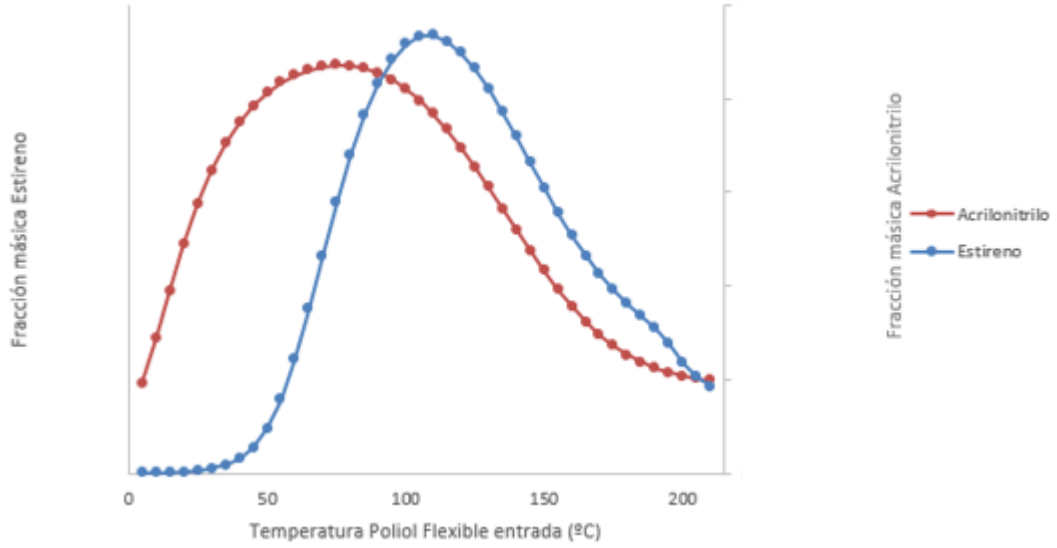


Figura 4.3. Variación de la fracción másica de acrilonitrilo y estireno en la corriente gaseosa a la atmósfera en función de la temperatura de entrada del poliol flexible.

4.1.2.2.2. Caudal de disolvente

A continuación se encuentra una gráfica que representa la fracción másica de estireno y acrilonitrilo a la salida del *scrubber* en función del caudal de poliol flexible y agua respectivamente. En la figura 4.4 se puede observar perfectamente que la recuperación de acrilonitrilo sigue una trayectoria de proporción inversa, es decir, a más disolvente menos emisión de ACN. Para el caso del estireno forma una parábola, la cual representa que absorbe grandes cantidades al principio pero a partir de los 2500 kg/h las emisiones a la atmósfera se mantienen prácticamente constantes.

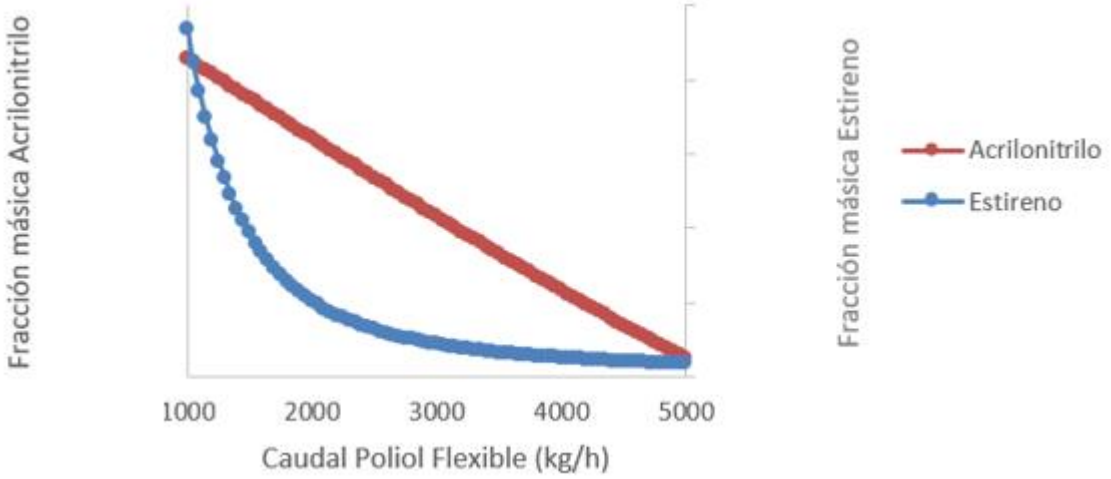


Figura 4.4. Variación de la fracción másica de acrilonitrilo y estireno en función del caudal de entrada de poliol flexible a 20ºC.

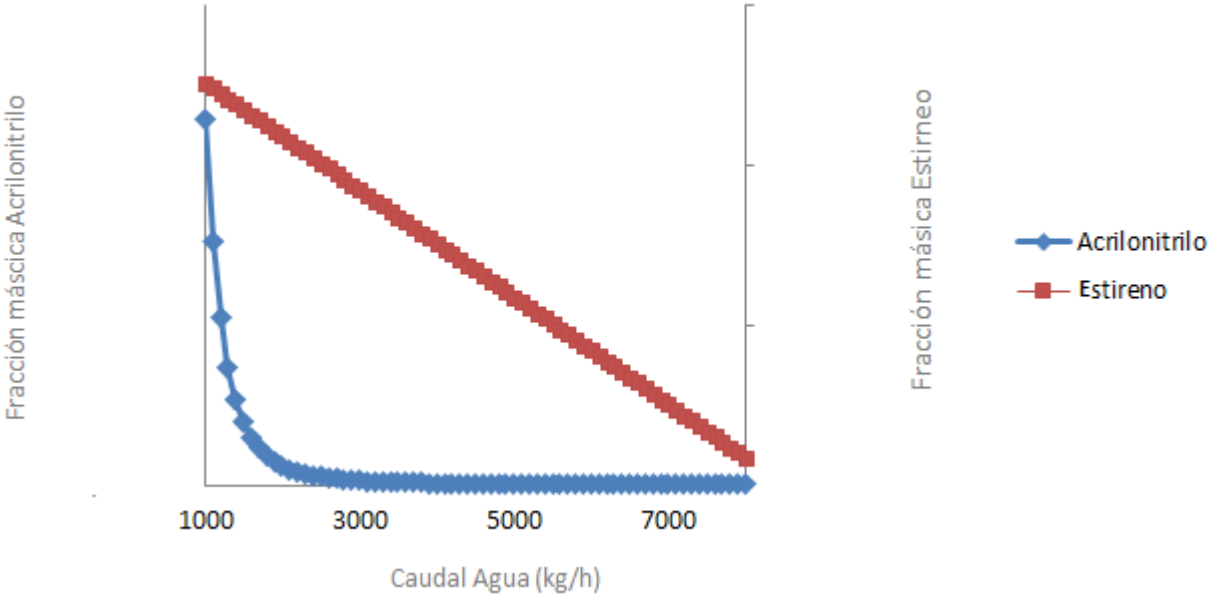


Figura 4.5. Variación de la fracción másica de acrilonitrilo y estireno en función del caudal de entrada de agua a 20ºC.

Usando agua como disolvente se produce el caso contrario que el de la figura 4.4 ya que es el estireno el que sigue una trayectoria de proporción inversa. En cambio el acrilonitrilo es fácilmente absorbido los primeros 2500 kg/h y después se mantiene prácticamente constante.

A través de las gráficas 4.3 y 4.4 se ha realizado una primera aproximación de caudal de poliol flexible y temperatura para el nuevo lavador de gases. Así pues, se ha estimado un flujo de 1500 kg/h a temperatura de 40ºC. Por otro lado, el único parámetro que se puede modificar del *Scrubber* actual

es el caudal de agua, que se ha fijado en 2500 kg/h. Una vez establecidos estos parámetros para las tres alternativas ya se puede realizar el estudio y comparación de éstas.

4.1.3. Configuración de la instalación

Tal y como se ha comentado en el apartado 2.4, se han planteado diversas configuraciones para la instalación (Ver figura 4.6.). En este apartado se verán los estudios realizados en *Hysys* de cada una de ellas.

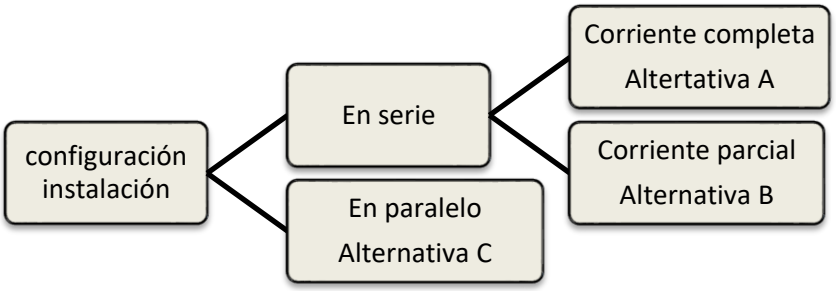


Figura 4.6. Posibles configuraciones de la nueva instalación.

4.1.3.1. Alternativa A: En serie, Corriente completa

En primer lugar, se seleccionaron las máximos valores de las medias horarias móviles del *scrubber* actual para tomarlos como referencia a la hora de realizar la simulación del *scrubber* D-1002 en hysys (ver figura 4.7) y así poder conocer los valores de los venteos. Estos valores no se han plasmado en el trabajo debido a su confidencialidad.

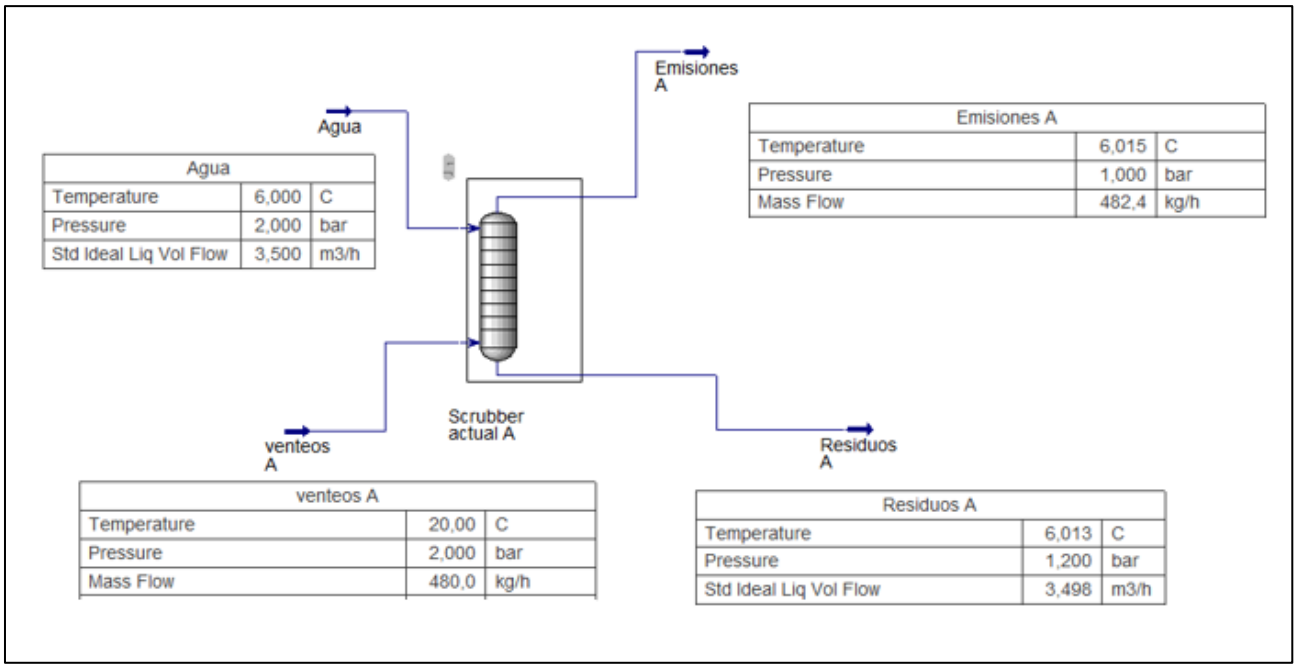


Figura 4.7. Simulación del *scrubber* actual D-1002.

A través de esta simulación se han podido conocer el caudal de nitrógeno y fracciones másicas de estireno y acrilonitrilo que llegan actualmente al lavador de gases. A continuación, en la tabla 4.1 quedan especificados dichos valores.

Tabla 4.1. Valores de la corriente de entrada al nuevo *scrubber* D-1001.

Caudal (kg/h)	**Fracción másica Estireno**	**Fracción másica Acrilonitrilo**	**Fracción másica Nitrógeno**
480	0.0027	0.0004	0.9969

Una vez conocidos estos valores se ha procedido a la simulación de esta alternativa mediante *Hysys* tal y como se observa en la figura 4.8.

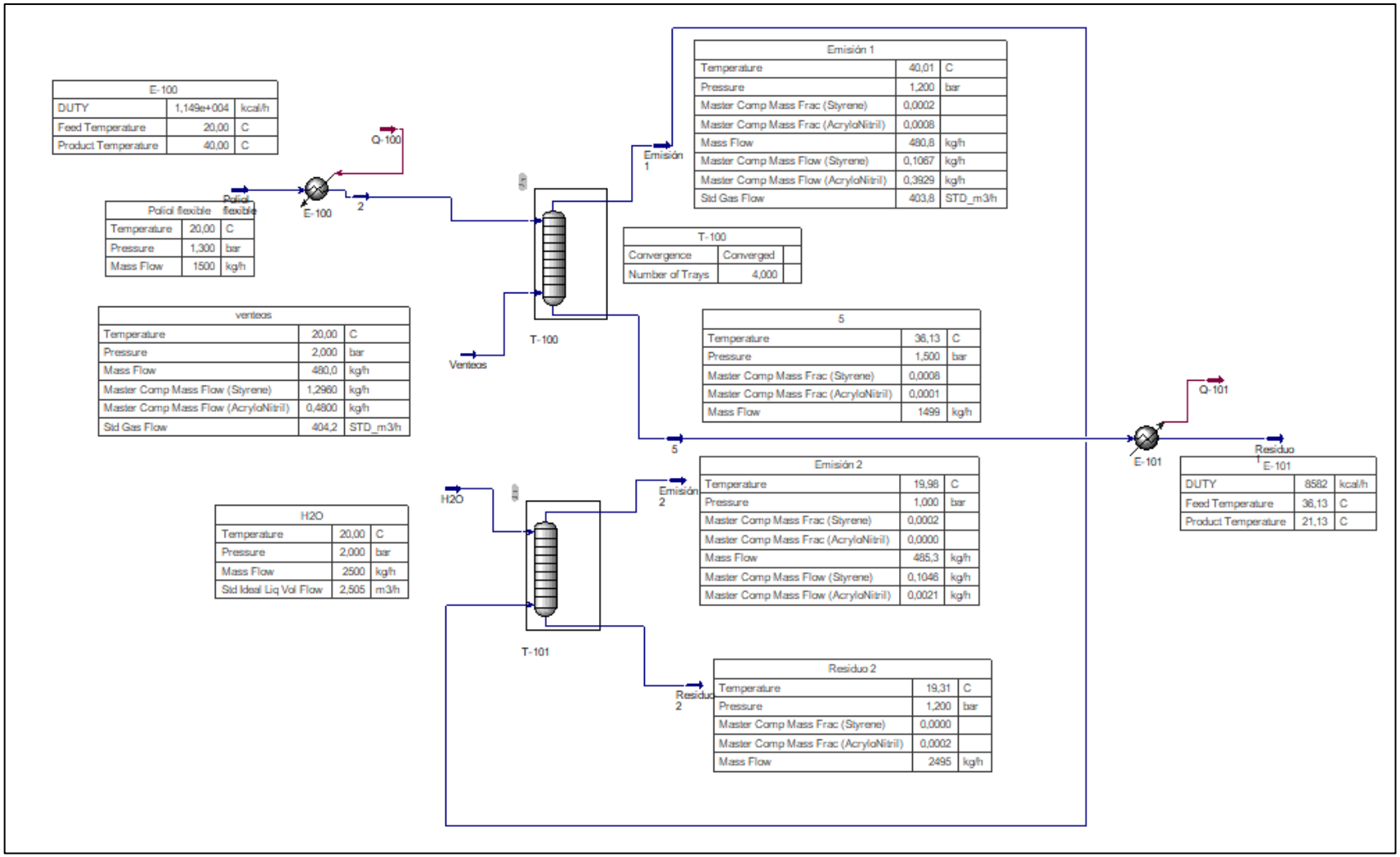


Figura 4.8. Simulación de la alternativa A.

En la figura 4.9, se ha representado el flujo másico de las emisiones de estireno y acrilonitrilo para el nuevo *scrubber* en función del número de etapas para tener una aproximación. Asimismo, en la figura 4.10 se ha representado el flujo másico de emisiones de estireno y acrilonitrilo en función del caudal de poliol flexible A priori en ambas figuras se observa que a medida que aumenta el número de etapas o el caudal de disolvente, la pendiente para el estireno es inferior. No obstante en el caso del acrilonitrilo se mantiene prácticamente constante. Esto se debe a que el poliol flexible no es un buen disolvente a 40ºC para este monómero.

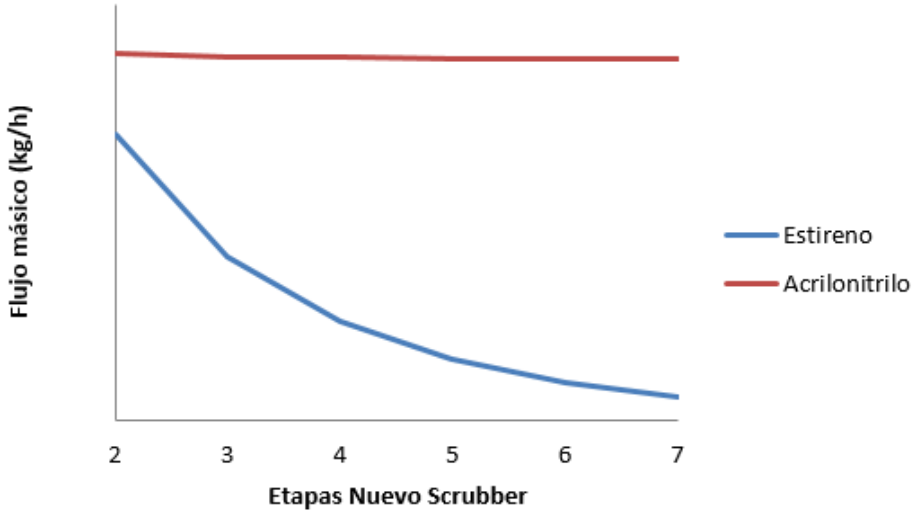


Figura 4.9. Flujo másico de las emisiones de estireno y acrilonitrilo en función del número de etapas del nuevo *Scrubber*.

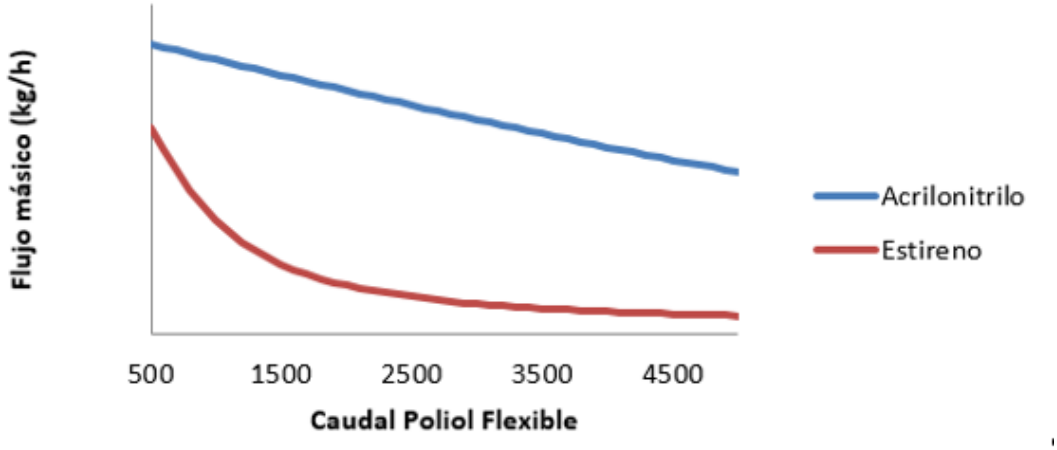


Figura 4.10. Flujo másico de emisiones de estireno y acrilonitrilo en función del caudal de disolvente para el nuevo *Scrubber*.

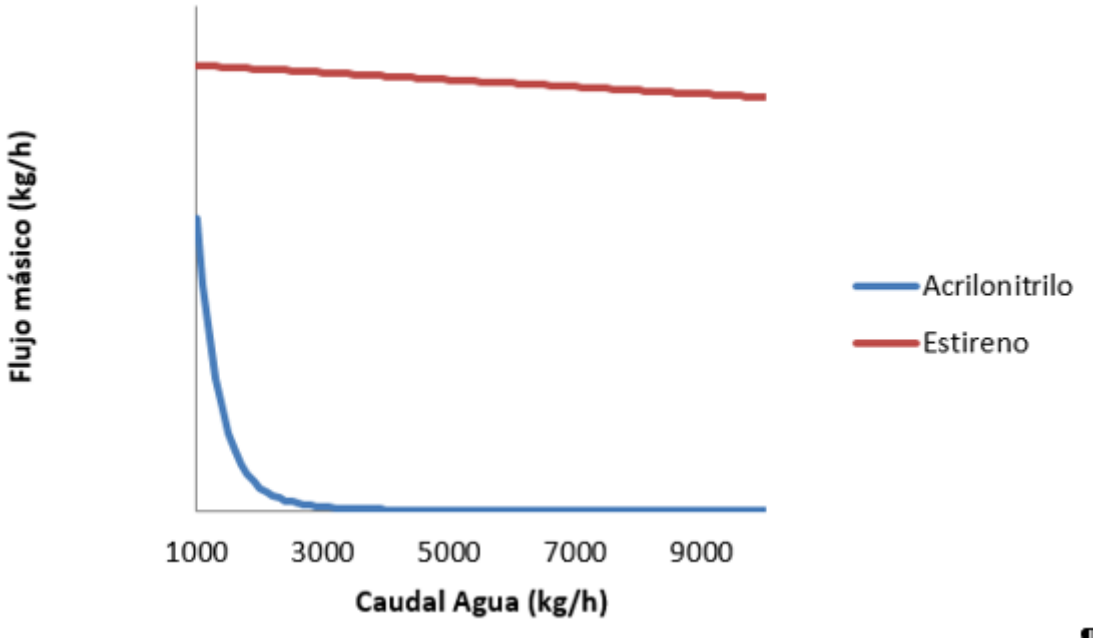


Figura 4.11. Flujo másico de emisiones de estireno y acrilonitrilo en función del caudal de disolvente para el *Scrubber* actual.

En este gráfico se corrobora que el agua no es un buen disolvente para el estireno ya que el flujo másico de éste se mantiene prácticamente constante. Por otro lado como ya se había dicho en la primera aproximación el caudal de 2500 kg/h parece ser el óptimo para llevar a cabo la separación del acrilonitrilo.

4.1.3.2. Alternativa B: En serie, Corriente parcial

Mediante el estudio que se ha realizado en el apartado 6.1. Emisiones, se han determinado que las corrientes con mayor concentración y caudal de estireno son las procedentes de la solución vinílica. Estos venteos se realizan de forma intermitente sobre venteos continuos como muestra la figura 4.12. En esta alternativa, las corrientes procedentes de la solución vinílica se enviarán al nuevo *scrubber* y posteriormente las emisiones de la salida de éste se enviarán al *scrubber* actual junto con el resto de venteos de las diferentes corrientes restantes tal y como se muestra en la figura 4.15

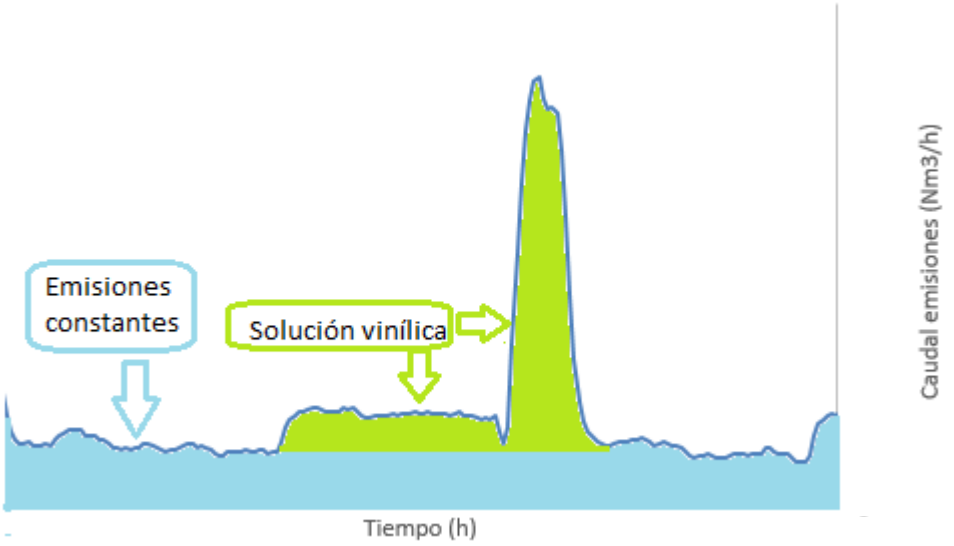


Figura 4.12. Separación de las corrientes de venteo.

Por lo tanto el valor de la media horaria móvil del caudal de las emisiones continuas se le restará al valor de la media móvil del caudal de las emisiones procedentes de la solución vinílica. Al igual que para la alternativa A, se especificaron las medias horaria móviles de las emisiones del *Scrubber* actual a la atmósfera con el fin de poder determinar los venteos de la corriente de entrada mediante una simulación en *Hysys*.

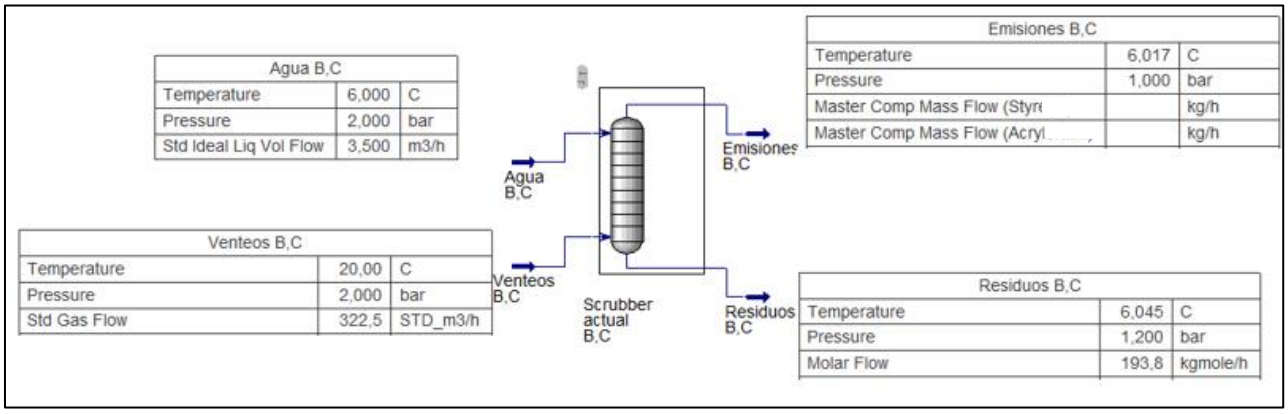


Figura 4.13 Simulación del *scrubber* actual de los venteos procedentes de la solución vinílica.

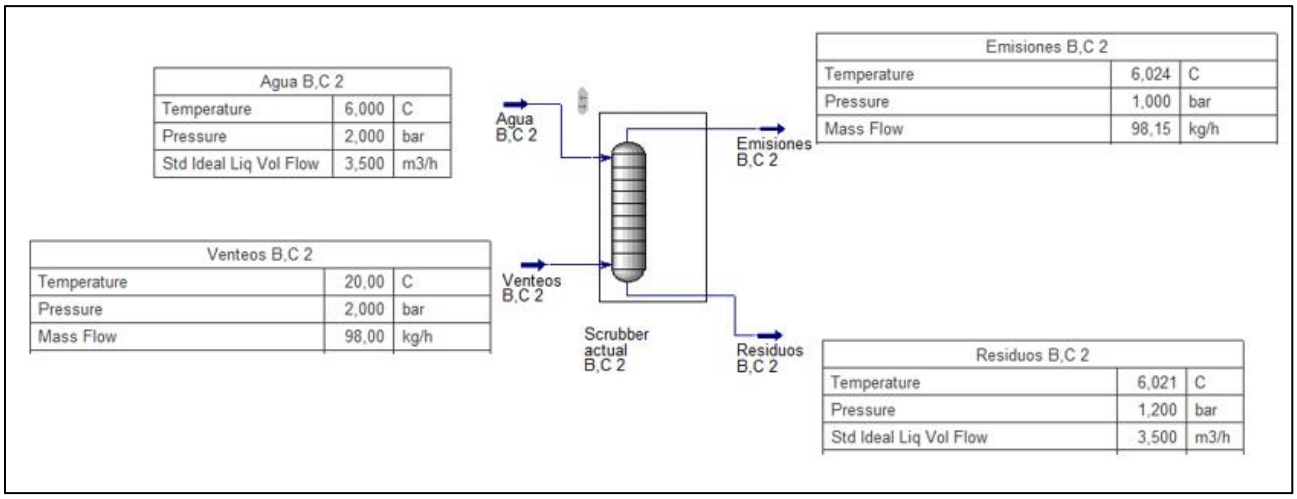


Figura 4.14. Simulación del *scrubber* actual de los venteos constantes.

A través de estas simulaciones representadas en las figuras 4.13 y 4.14 se han podido conocer los caudales de nitrógeno y fracciones másicas de estireno y acrilonitrilo que llegan actualmente al lavador de gases procedentes de los tanques de solución vinílica y venteos constantes por separado. A continuación quedan especificados dichos valores en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2. Valores de la corriente de entrada al nuevo *scrubber*.

Caudal (kg/h)	**Fracción másica Estireno**	**Fracción másica Acrilonitrilo**	**Fracción másica Nitrógeno**
383	0.0027	0.0001	0.9963

Tabla 4.3. Valores de la corriente de entrada al *scrubber* D-1002.

Caudal (kg/h)	**Fracción másica Estireno**	**Fracción másica Acrilonitrilo**	**Fracción másica Nitrógeno**
99	0.0032	0.001	0.9958

Una vez conocidos estos valores se ha procedido a la simulación de esta alternativa mediante *Hysys* tal y como se observa en la figura 4.15.

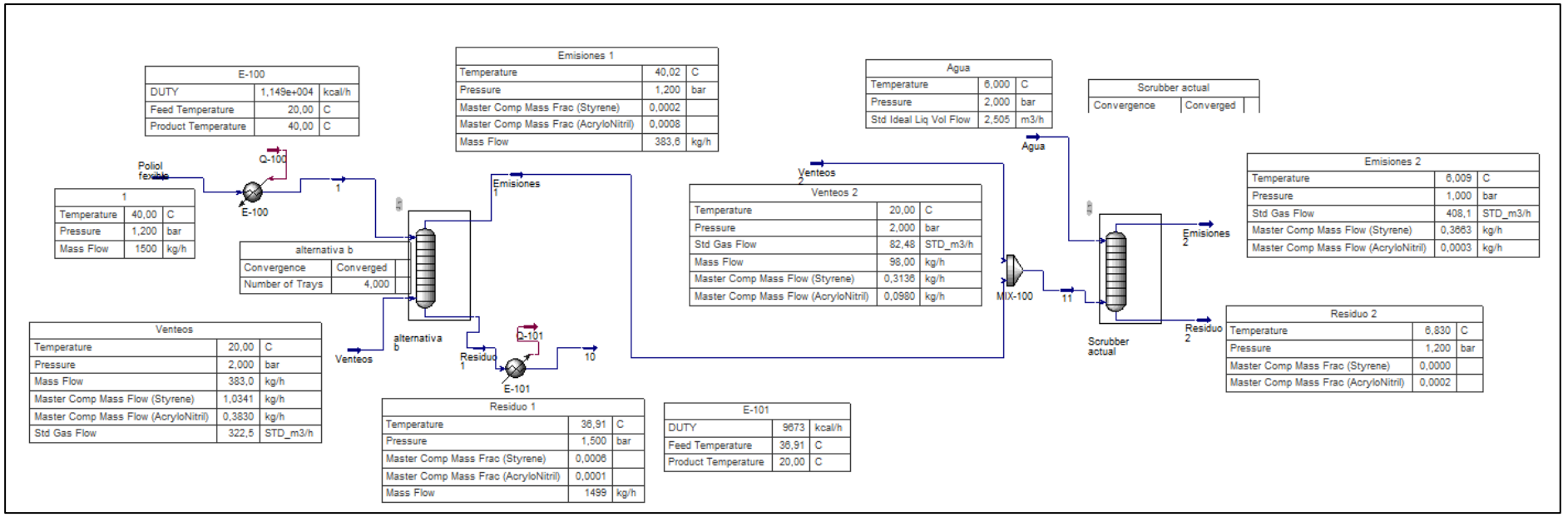


Figura 4.15. Simulación de la alternativa B.

Al igual que para la alternativa anterior, se han representado en la figura 4.16, el número de etapas para el nuevo *scrubber* en función del flujo másico de los monomeros a la salida de la absorción y en la figura 4.17 el flujo másico de emisiones de los monómeros en función del caudal de disolvente para el nuevo *Scrubber*. En ambas se sigue prácticamente la misma tendencia que en el apartado 4.1.3.1.

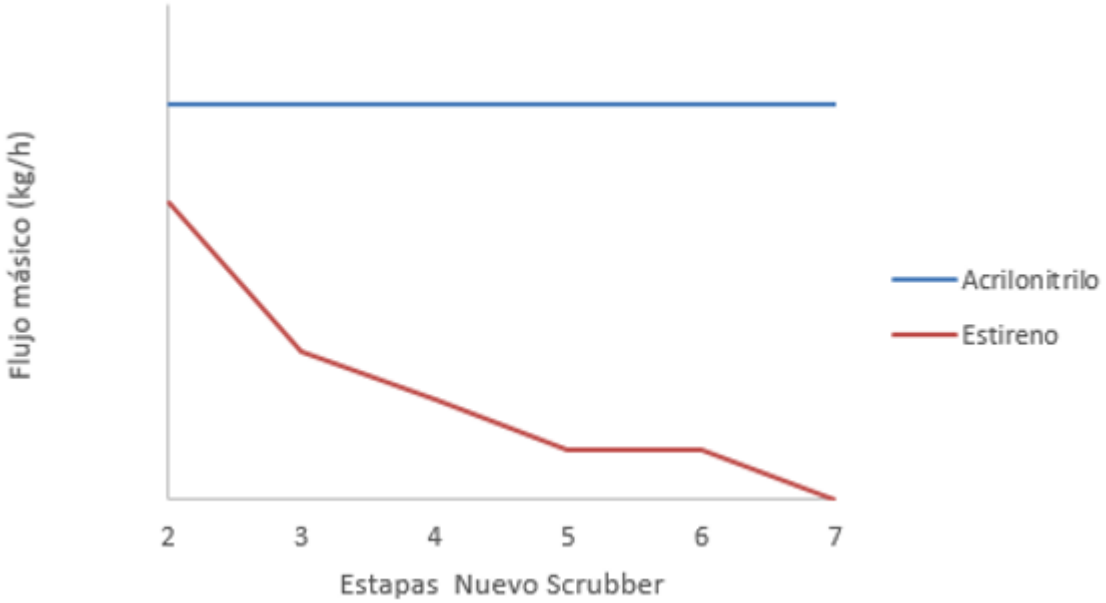


Figura 4.16. Flujo másico de las emisiones de estireno y acrilonitrilo en función del número de etapas del nuevo *Scrubber*.

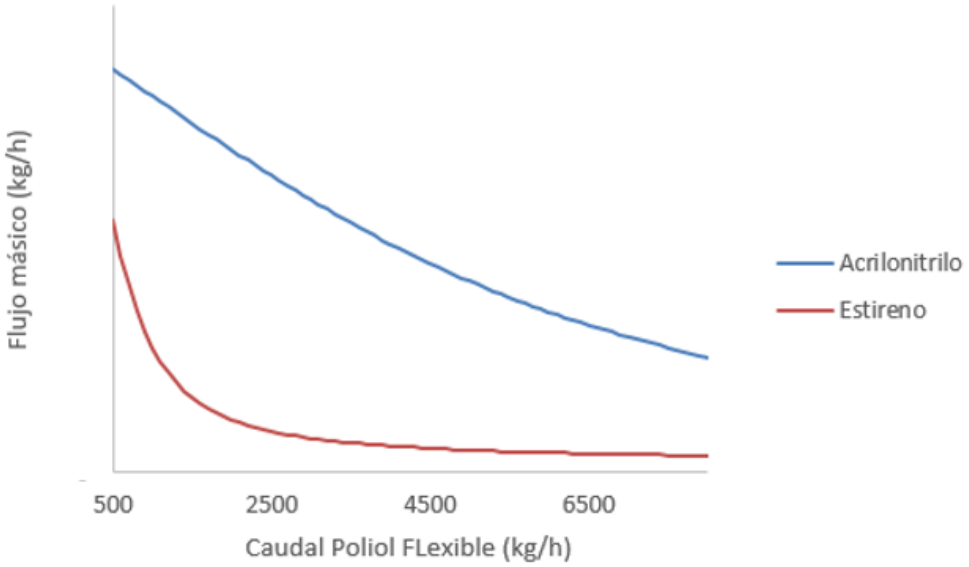


Figura 4.17. Flujo másico de emisiones de estireno y acrilonitrilo en función del caudal de disolvente para el nuevo *Scrubber*.

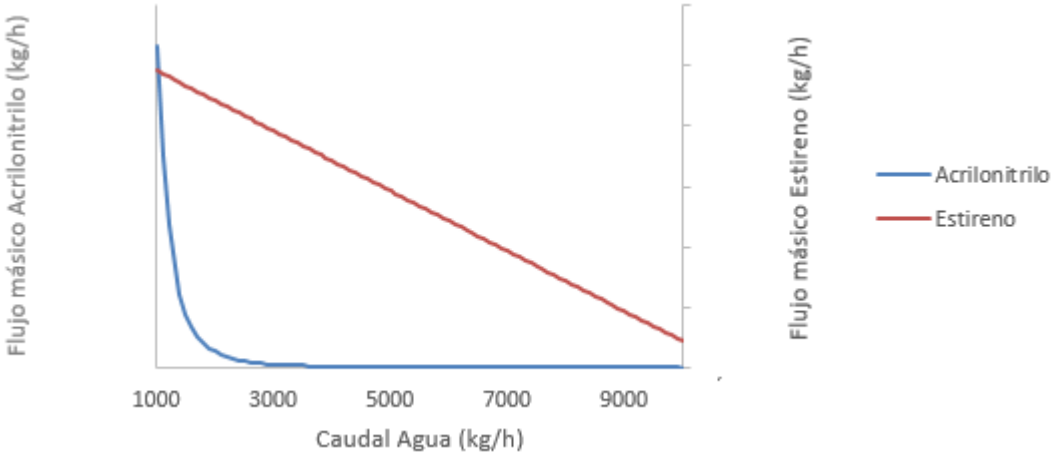


Figura 4.18. Flujo másico de emisiones de estireno y acrilonitrilo en función del caudal de disolvente para el *Scrubber* actual.

Al igual que en el gráfico 4.11 de la alternativa anterior, se observa que el flujo másico a la salida para el estireno varía muy poco. Sin embargo para el caso del acrilonitrilo se corrobora que el caudal óptimo está en los 2500 kg/h.

4.1.3.3. Alternativa C: En paralelo

Como la división de las corrientes es igual que la alternativa B, se utilizarán los mismos valores de emisiones a la atmósfera del *scrubber* actual llevar a cabo la simulación de la alternativa C.

A continuación se presenta la simulación en *Hysys* de la alternativa C.

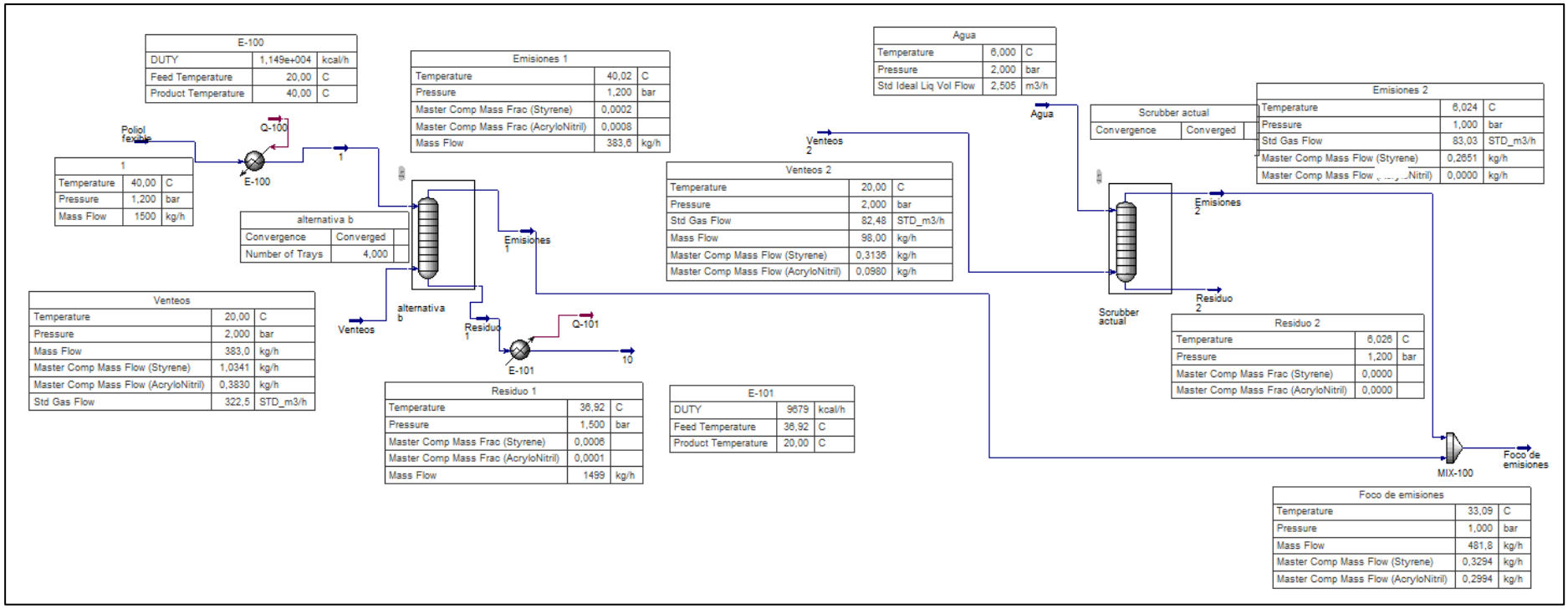


Figura 4.19. Simulación de la alternativa C.

Los gráficos referentes al nuevo *scrubber* serán exactamente los mismos que los de la alternativa B (ver figura 4.16 y 4.17.). Por otro lado se ha estudiado la variación de flujos de emisión para los monómeros en función del caudal de agua para optimizar el *scrubber* actual.

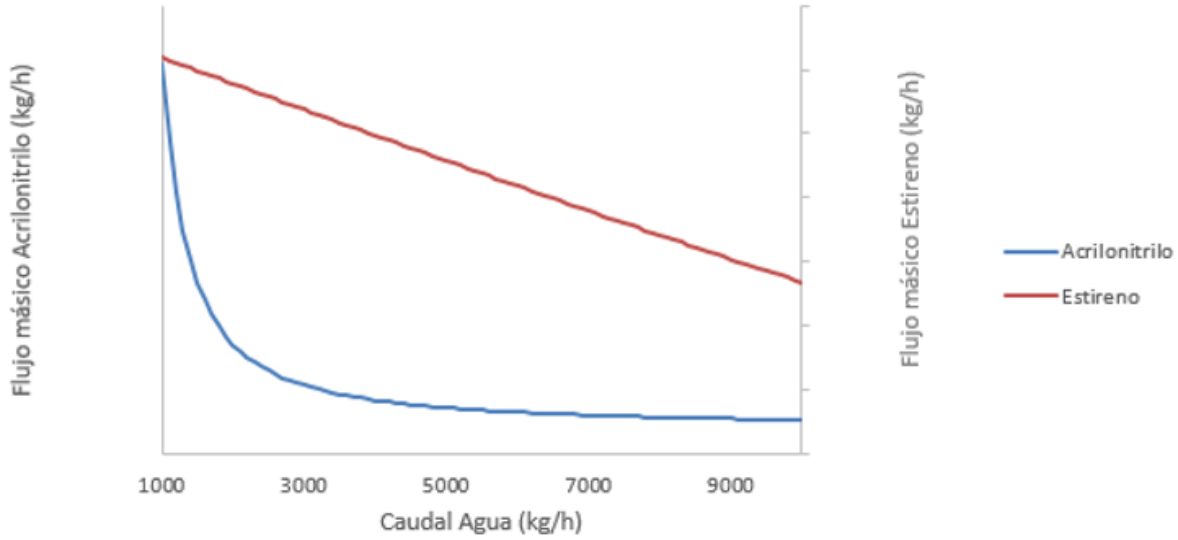


Figura 4.20. Flujo másico de Acrilonitrilo y Estireno en función del Caudal de agua.

4.1.4. Resultados

Tras el estudio realizado en *Hysys* de las tres alternativas se procede a comparar las emisiones de las éstas en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4. Comparación del nuevo *Scrubber* para las diversas alternativas.

Parámetros	**Alternativa A**	**Alternativa B**	**Alternativa C**
Poliol flexible (kg/h)	1500	1500	1500
Acrilonitrilo (kg/h)			
Estireno (kg/h)			
Número etapas	4	4	4
Temperatura operación (ºC)	40	40	40
Destino	*Scrubber* actual	*Scrubber* actual	Atmósfera
VLE's actual	✓	✓	✓
VLE's nuevo	✓	✓	✗

Tabla 4.5. Comparación del *Scrubber* existente para las diversas alternativas.

Parámetros	**Alternativa A**	**Alternativa B**	**Alternativa C**
Agua (kg/h)	2500	2500	2500
Acrilonitrilo (kg/h)			
Estireno (kg/h)			
Temperatura operación (ºC)	Ambiente	Ambiente	Ambiente
Destino	Atmósfera	Atmósfera	Atmósfera
VLE's actual	✓	✓	✓
VLE's nuevo	✓	✓	✓

Dados los datos mostrados en las tablas anteriores, en primer lugar se ha descartado la alternativa C puesto que el valor del caudal del acrilonitrilo emitido a la atmósfera superan los posibles VLE's. Esto era de esperar ya que el poliol flexible tal y como se muestra en la figura 4.5 a la temperatura escogida no es un buen disolvente para el acrilonitrilo.

Por otro lado, la alternativa B solo se encuentra un 10% por debajo del posible límite establecido por la Asociación Ambiental para el estireno. Esto se debe a que la cantidad de estireno enviado al *scrubber* actual se ha disminuido pero como no es un buen disolvente para este compuesto, prácticamente todo el estireno procedente de los venteos a este *scrubber* es enviado directamente a la atmósfera.

Ambas alternativas A y B operarían dentro de los VLE's. No obstante, se ha elegido finalmente la alternativa A por emitir menos concentración de estireno y acrilonitrilo a la atmósfera.

4.1.5. Simulación de la alternativa final

Una de las razones por las que se escogió el uso de Poliol Flexible como disolvente es que no genera residuos ya que el poliol utilizado se recircularía a la alimentación de solución vinílica. La alimentación a la solución vinílica se trata de un proceso *batch* que alimenta 3500 kg de poliol flexible cada dos horas junto con estireno y acrilonitrilo ente otros aditivos.

Este hecho hace que la nueva instalación requiera de una recirculación de disolvente hasta que se abra la alimentación a solución vinílica. No obstante, como las simulaciones en *Hysys* son estáticas se ha considerado una corriente de salida constante que no puede superar 1750 kg/h.

Mediante *Hysys* se realizó la simulación de la instalación tal y como muestra la figura 4.21. En esa simulación se observó que a medida que aumenta el caudal de recirculación, aumentaban las

emisiones. Por lo tanto, se suprimió la recirculación de la simulación ya que el hecho de añadir un caudal de recirculación sin variar el caudal fresco de alimentación, no implica que se absorba menos estireno.

En la tabla 4.6 se muestran los caudales de operación que se han fijado para la instalación una vez acabado el estudio en *Hysys*.

Tabla 4.6. Corrientes del lavador de gases D-1001.

Alimentación Poliol Flexible (kg/h)	**Recirculación Poliol Flexible (kg/h)**	**Alimentación solución vinílica (kg/h)**	**Alimentación venteos (kg/h)**
1000	1000	6000	480

Se ha establecido un caudal de 6000kg/h ya que se quiere evacuar el poliol flexible almacenado en el lavador de gases durante dos horas (2000kg/h) en un tiempo de 20 min. Por un tema de seguridad, el depósito almacén de D-1001 siempre contendrá $1m^3$ de poliol flexible para recircular. La cantidad restante de poliol flexible necesaria para la alimentación de la solución vinílica se completará desde los tanques de almacenamiento de poliol flexible.

Debido a la alta viscosidad del Poliol flexible y a que la temperatura de operación no es muy elevada (50ºC), se han seleccionado intercambiadores de placas. En cuanto a la elección de la bomba se ha decidido utilizar de desplazamiento positivo por la misma razón mencionada anteriormente para los intercambiadores.

Finalmente, se ha descartado la opción de cambiador carga-efluente debido a que el proceso de alimentación de poliol flexible a solución vinílica es un proceso *batch*, mientas la alimentación del *scrubber* se trata de un proceso continuo. A parte, el calor que se ha de subministrar para calentar el poliol flexible a 50ºC es muy bajo.

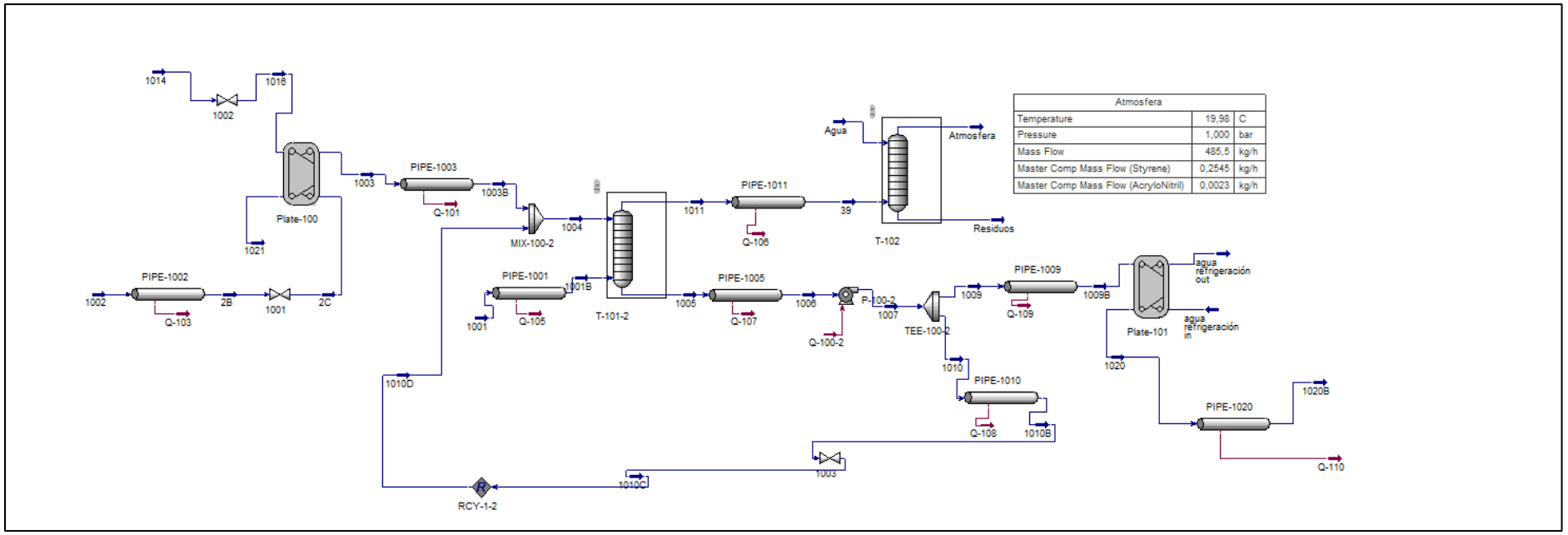


Figura 4.21. Simulación en *Hysys* de la alternativa final con recirculación.

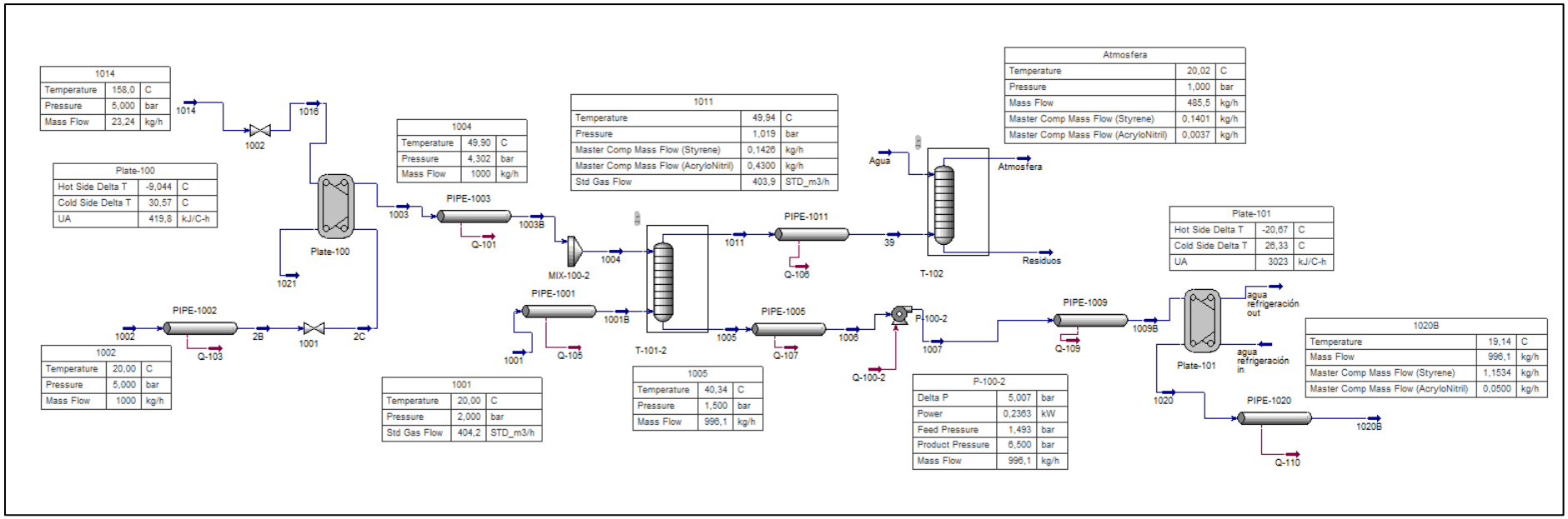


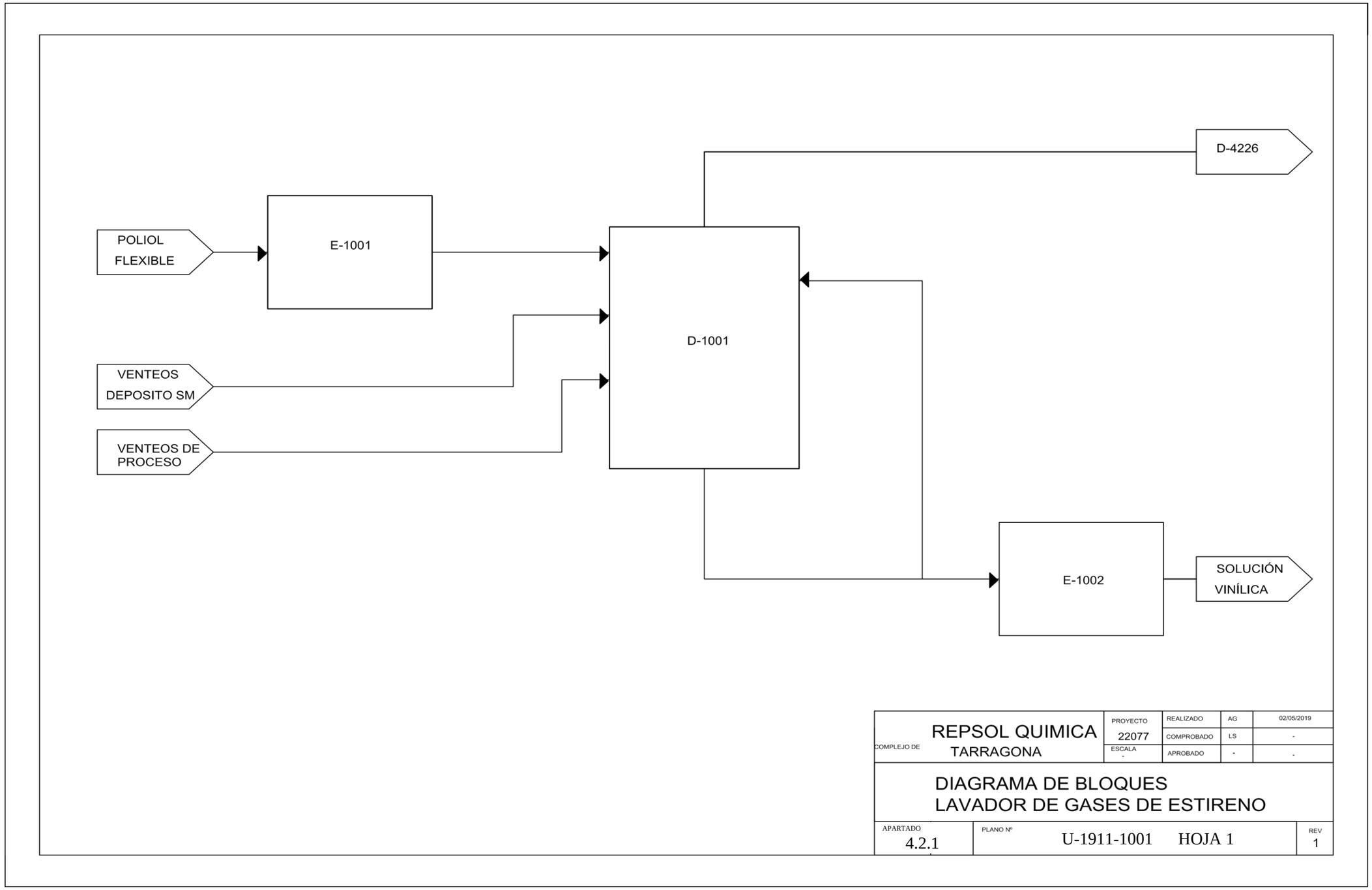
Figura 4.22. Simulación en *Hysys* de la alternativa final.

4.2. Elaboración de diagramas

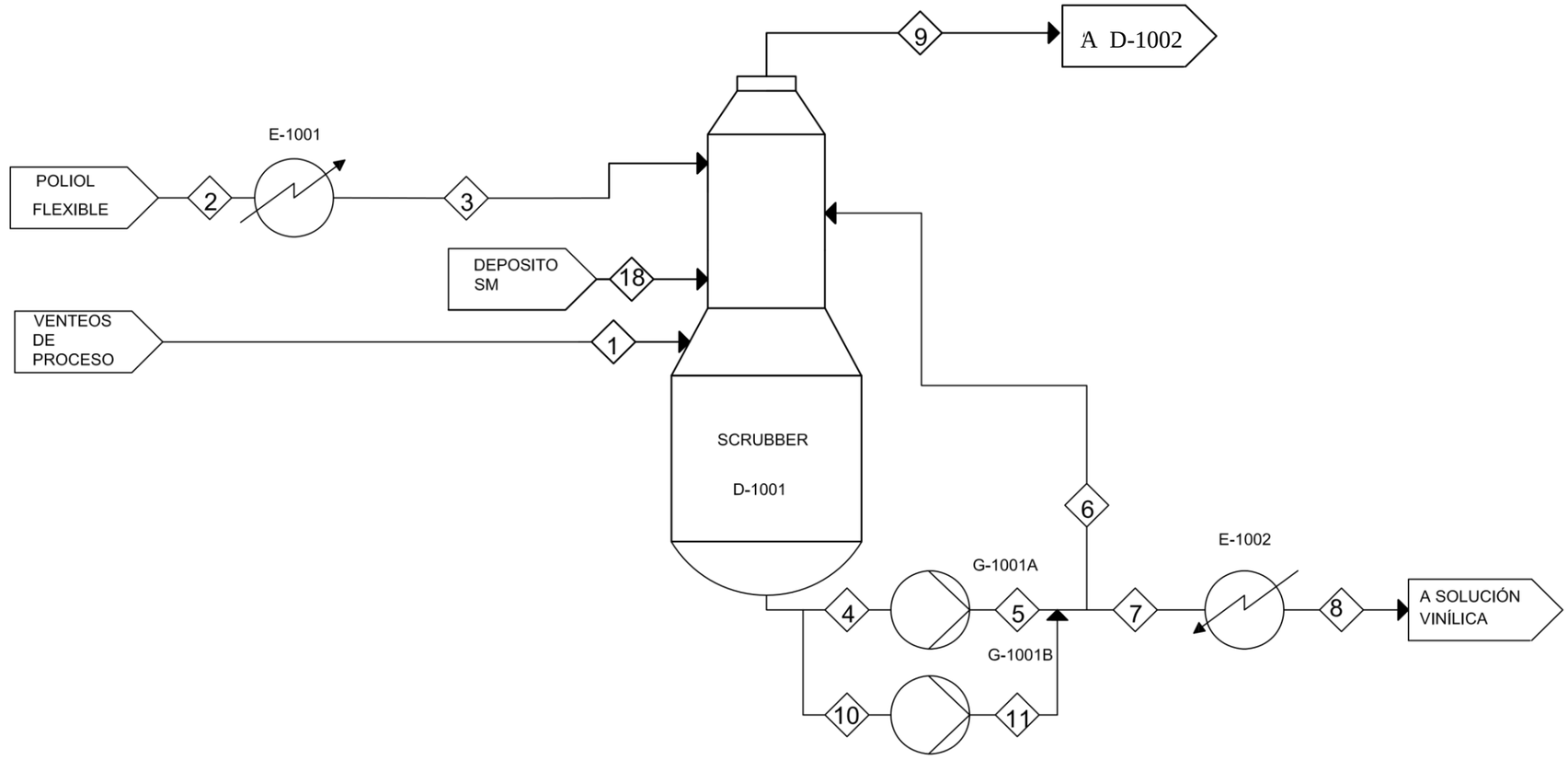
Seguidamente se muestran los diferentes diagramas de la instalación, empezando por la representación más simple, diagrama de bloques. Posteriormente se ha realizado un diagrama de flujo de procesos (PFD) en donde cada paso del proceso se representa por un símbolo diferente. La representación más detallada se trata del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID). Con tal de entender las abreviaturas y símbolos que se han plasmado en los diagramas se ha realizado un cuadro de simbología.

Finalmente se ha llevado a cabo el layout de la instalación donde se representa la distribución de los diferentes equipos así como las respectivas distancias entre ellos.

4.2.1. Diagrama de bloques



4.2.2. Diagrama del proceso



Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	18
Temperatura (ºC)	20	20	50	40	40.7	40.7	40.7	20	50	20
Presión(barg)	7	4	3.3	2.2	6.5	6	6	5.5	1.02	1.02
Caudal másico (kg/h)	383	1000	1000	7000	7000	1000	6000	6000	480	99
Compuestos (kg/h)										
Estireno	1.1	0	0	8.1	8.1	1.2	7	7	0.14	0.3
Acrilonitrilo	0.1	0	0	0.35	0.35	0.05	0.3	0.3	0.43	0.1
Nitrogeno	381	0	0	0.21	0.21	0.03	0.2	0.2	478	98.6
Poliol Flexible	0	1000	1000	6991	6991	998	5992	5992	5	0

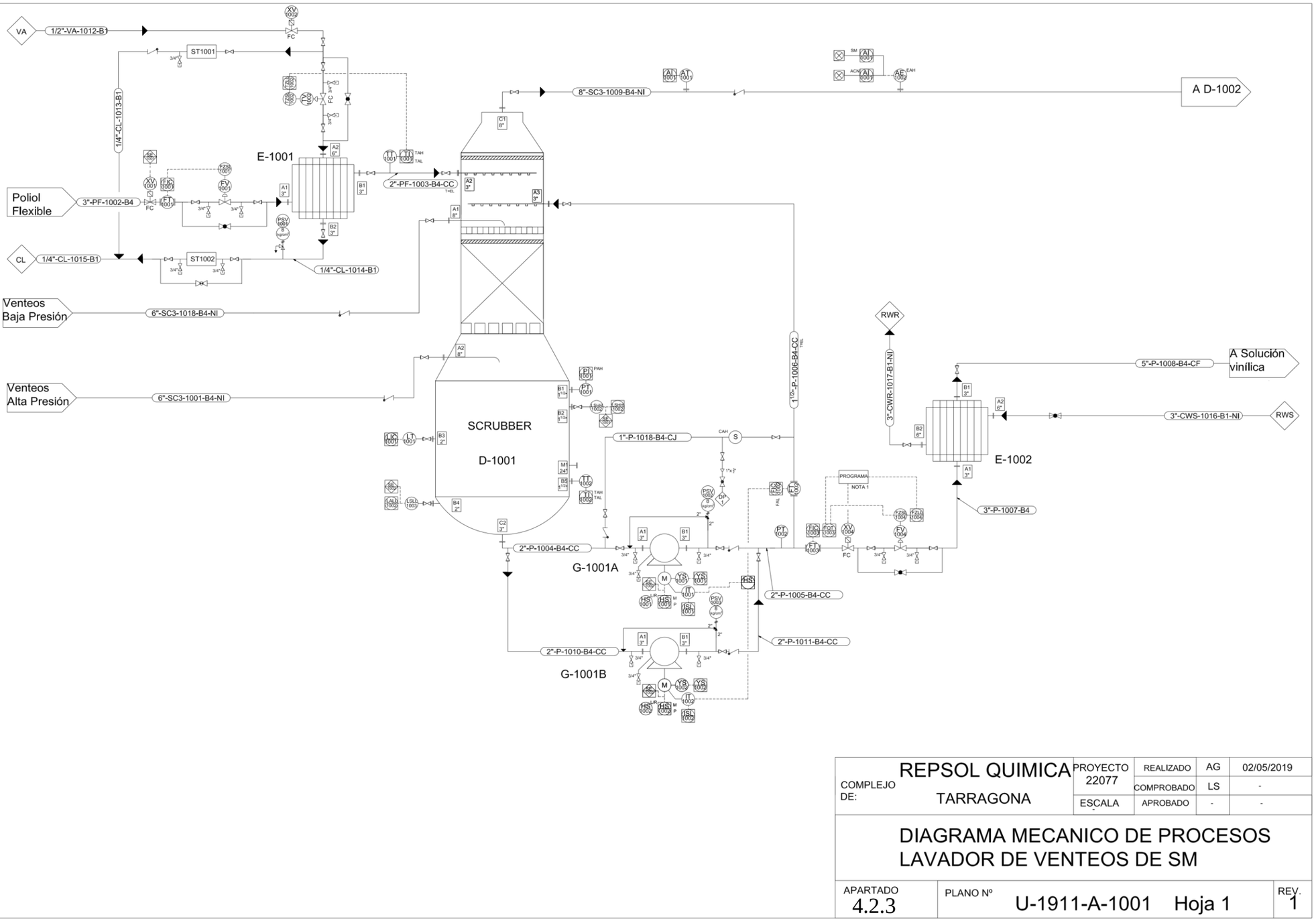
REPSOL QUÍMICA COMPLEJO DE: TARRAGONA	PROYECTO 22077	REALIZADO	AG	29/04/2019
		COMPROBADO	LS	-
	ESCALA -	APROBADO	-	-

PFD

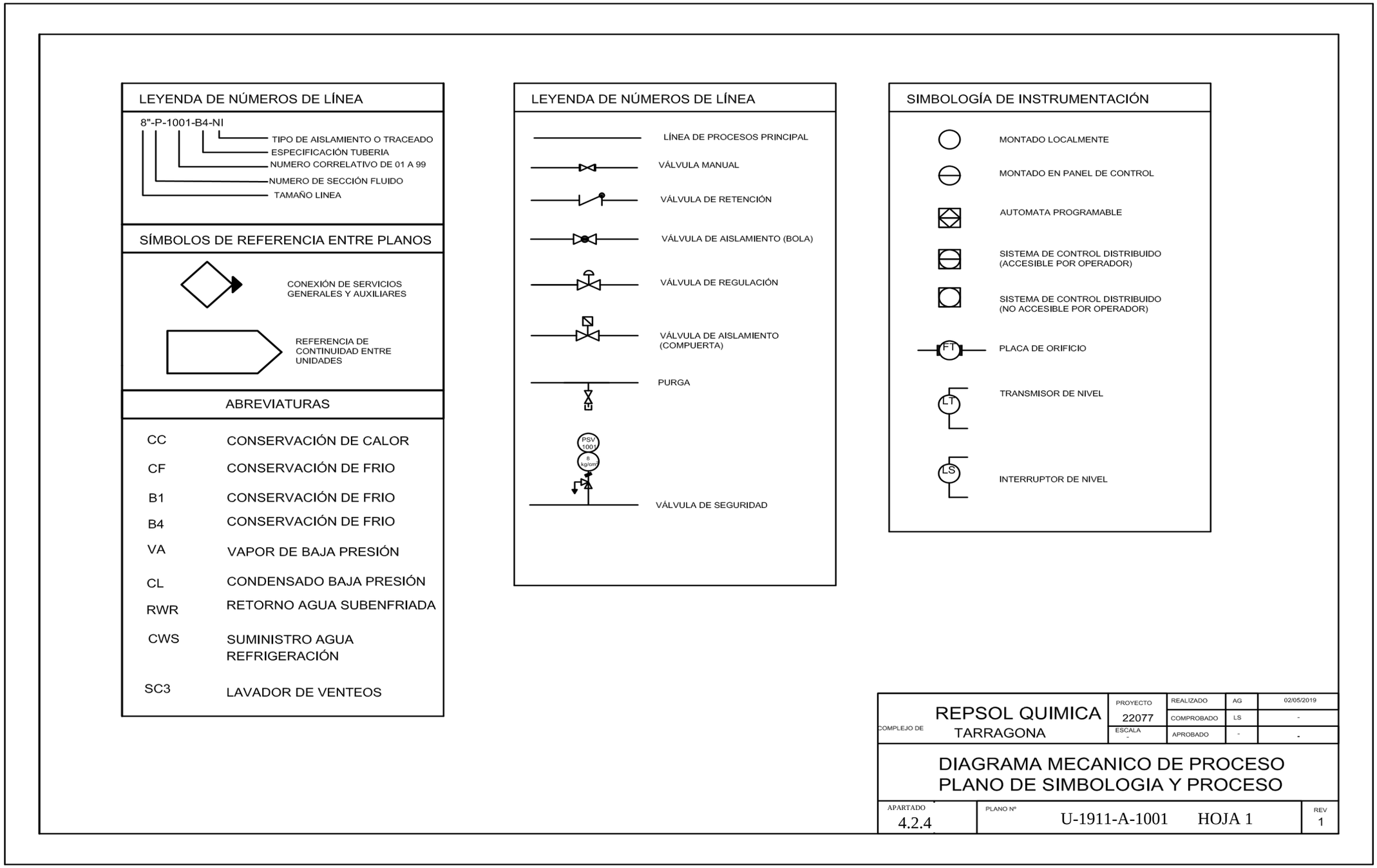
LAVADOR DE VENTEOS DE SM

APARTADO	PLANO Nº:		Rev.
4.2.2	U-1911-A-1001	HOJA	1

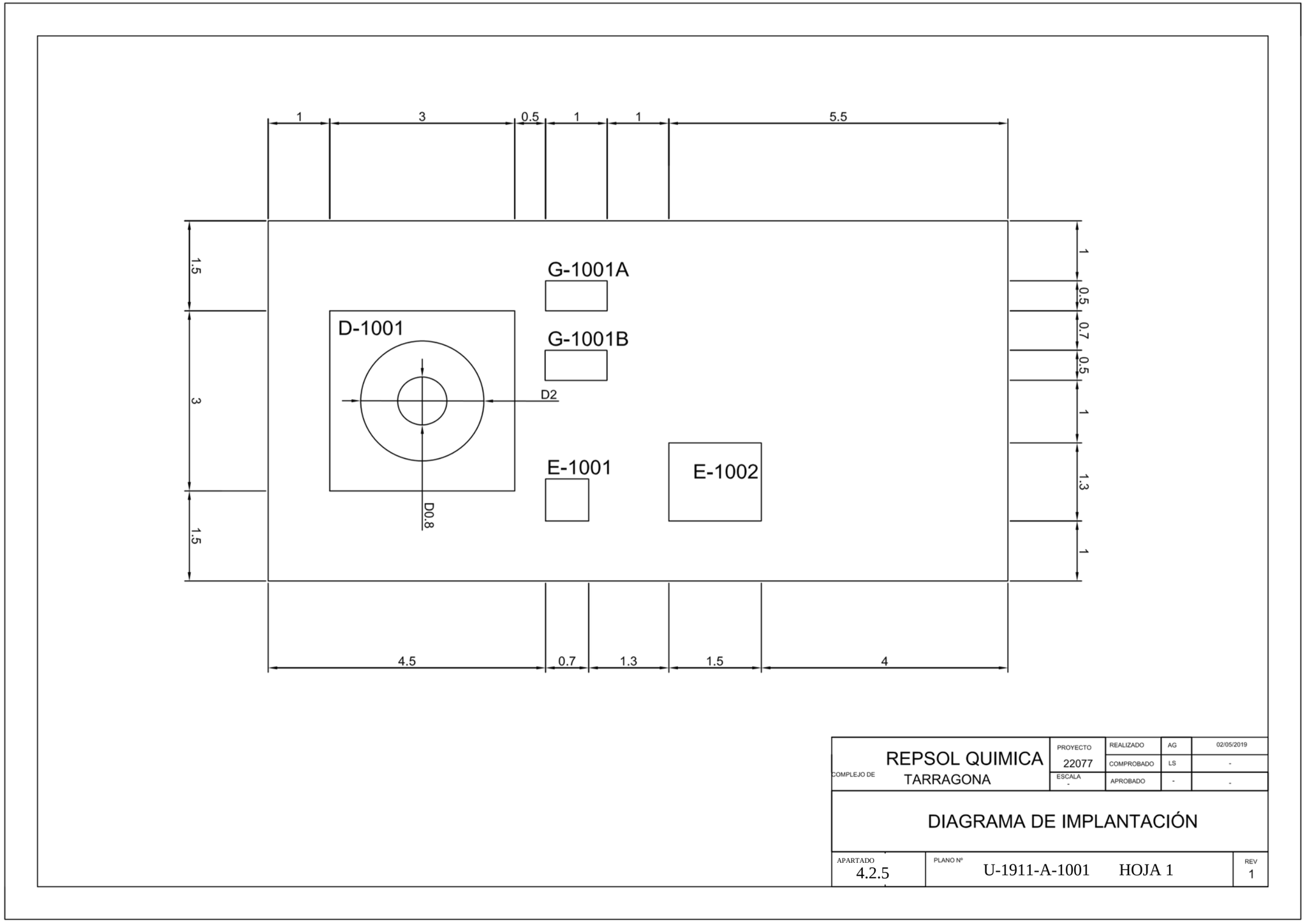
4.2.3. Diagrama de tuberías e instrumentación



4.2.4. Simbología



4.2.5. Diagrama de implantación



4.3. Diseño y listado de tuberías

4.3.1. Diseño de las tuberías

El material seleccionado para cada línea depende del tipo de fluido que circula por su interior además de las condiciones de presión y temperatura de éste. Haciendo uso de la guía de especificaciones de material de tuberías de Repsol (Ref. 5), se ha escogido B1 para las líneas de servicio y B4 para las líneas de proceso.

Acorde con la guía la especificación B1 corresponde al material CS, adecuado para aguas poco corrosivas, aire de planta, nitrógeno, condensado y vapor de agua ya que aguanta temperaturas hasta 450ºC. Por otro lado la especificación B4 KCS adecuado para compuestos aromáticos e hidrocarburos y un rango de temperaturas de 0 a 175ºC.

Una vez seleccionado el material se han dimensionado las tuberías. Este dimensionamiento está determinado por el caudal y velocidad del flujo. Como primera aproximación se ha seleccionado una velocidad de 2 m/s para líquidos y 20 m/s en el caso de que el flujo sea gaseoso. Con las velocidades mencionadas anteriormente y caudales volumétricos procedentes del balance de materia (ver apartado 4.2.2.) se fija el área según la ecuación (4.1)

$$A\ (m^{2}) = \frac{Q\ (m^3/s)}{v\ (m/s)} \qquad \text{Ec. (4.1.)}$$

Finalmente, se determina el diámetro interior con la ecuación (6)

$$D\ (m) = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \qquad \text{Ec. (4.2.)}$$

Una vez calculados los diámetros se normalizan (Ref. 6) y se calculan las velocidades reales.

Para determinar las pérdidas de carga debido al rozamiento, en primer lugar se han tenido que fijar las longitudes, instrumentación y diferencias de altura para cada línea tal y como se muestra en la tabla 4.8

Las pérdidas por fricción se calculan (Ref. 7) a través de la ecuación de Darcy (Ec.4.3.) dónde "f" representa el factor de fricción que depende de si el régimen es turbulento (ver Ec.4.4.) o laminar (ver Ec.4.5.). Al calcular el número de Reynolds (ver Ec.10.) con las velocidades y diámetros calculados anteriormente nos proporciona un régimen Turbulento.

$$h_L = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D_{INT} \cdot 2 \cdot g} \qquad \text{Ec. (4.3.)}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[log\left(\frac{1}{3.7 \cdot \frac{D_{INT}}{\varepsilon}} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \qquad \text{Ec. (4.4.)}$$

Donde ε es la rugosidad de la tubería expresada en mm.

$$f = \frac{64}{Re} \qquad \text{Ec. (4.5.)}$$

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D_{INT}}{\mu}$$ Ec. (4.6.)

A continuación se calculan las perdidas menores con la siguiente igualdad:

$$h_m = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot f \cdot \sum \frac{L_{eq}}{D_{INT}}$$ Ec. (4.7.)

Donde $\frac{L_{eq}}{D_{INT}}$ es un valor tabulado para cada instrumento de la línea como muestra la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Longitud equivalente de los instrumentos.

Instrumento	Válvula Globo	Válvula compuerta	Válvula check	Codos
L/D	145	3	50	30

Finalmente se realiza un balance de energía mecánica entre dos puntos del proceso haciendo uso de la ecuación de Bernoulli (Ec. 4.8.) con tal de conocer la presión en cada tramo.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + h_l + h_m$$ Ec. (4.8.)

Donde:

P_1 y P_2 son las presiones de cada tramo en (Pa a)

$v_1 \, y \, v_2$ son velocidades en cada tramo (m/s)

$z_1 \, y \, z_2$ son las alturas a las que se encuentra cada tramo

Debido a la alta viscosidad del Poliol Flexible, las pérdidas de carga para las líneas de proceso son muy elevadas. Con tal de disminuir las pérdidas de presión por rozamiento, se han aumentado los diámetros de las tuberías (Ref. 6) y posteriormente se han recalculado las pérdidas de presión.

Tabla 4.8. Parámetros y resultados del diseño de tuberías.

Línea	Longitud (m)	Δh (m)	Longitud Equivalente (m)	Diámetro interior(mm)	Grosor (mm)	Perdida presión (Bar)
1	20.0	1.00	58.3	168	9.15	$1.4 \cdot 10^{-3}$
2	300	2.00	325	88.9	4.45	0.690
3	10.0	2.00	13.0	60.3	5.54	0.260
4	5.00	-	7.00	60.3	5.54	0.021
5	2.00	-	8.50	60.3	5.54	0.440
6	4.00	2.00	11.0	48.3	5.08	0.430

Línea	Longitud (m)	Δh (m)	Longitud Equivalente (m)	Diámetro interior(mm)	Grosor (mm)	Perdida presión (Bar)
7	5.00	-	22.5	88.9	4.45	0.150
8	400	15.0	424	141	8.15	2.10
9.	300	-	327	219	9.55	$2.2 \cdot 10^{-4}$

4.3.2. Listado de tuberías

En la siguiente tabla se han plasmado el listado de tuberías del P&ID (ver apartado 4.2.3.).

Tabla 4.9. Listado de tuberías.

Nº Línea	**De**	**A**	**Tipo Fluido**	**Fase**	**Corrosivo**	**Temp. Op. (ºC)**	**Temp. Dis. (ºC)**
6”-CS3-1001-B4-Ni	Colector de venteos	D-1001	N_2, ACN, SM	V	No	20	40
3”-PF-1002-B4	Almacén Poliol Flexible	E-1001	Poliol Flexible	L	No	20	40
2”-PF-1003-B4-CC	E-1001	D-1001	Poliol Flexible	L	No	50	70
2”-P-1004-B4-CC	D-1001	G-1001A	Poliol Flexible con ACN y SM	L	No	40.2	60
2”-P-1005-B4-CC	G-1001A	3”-P-1007-B4-CC	Poliol Flexible con ACN y SM	L	No	40.7	60
$1^{1/2}$”-P-1006-B4-CC	2”-P-1005-B4-CC	D-1001	Poliol Flexible con ACN y SM	L	No	40.7	60
3”-P-1007-B4-CC	2”-P-1005-B4-CC	E-1002	Poliol Flexible con ACN y SM	L	No	40.7	60
5”-P-1008-B4-CF	E-1002	Solución vinílica	Poliol Flexible con ACN y SM	L	No	20	40
8”-P-1009-B4-Ni	D-1001	D-1002	N_2, ACN, SM	V	No	50	70

Nº Línea	De	A	Tipo Fluido	Fase	Corrosivo	Temp. Op. (ºC)	Temp. Dis. (ºC)
2”-P-1010-B4-CC	2”-P-1005-B4-CC	G-1001B	Poliol Flexible con ACN y SM	L	No	40.2	60
2”-P-1011-B4-CC	G-1001	2”-P-1005-B4-CC	Poliol Flexible con ACN y SM	L	No	40.7	60

Tabla 4.10. Continuación del listado de tuberías.

Nº Línea	P Op (kg/cm^2 r)	P Dis. (kg/cm^2 r)	Caudal (kg/h)	Densidad a P,T (kg/m^3)	Viscosidad a P,T (cp)	ΔP Fric (kg/cm^2)	v (m^2/s)	Aislam.
6”-CS3-1001-B4-Ni	1.02/7	10	480	2.3	0.002	0.001	3.28	-
3”-PF-1002-B4	5	10	1000	842.2	654	0.58	0.07	-
2”-PF-1003-B4-CC	3.3	10	1000	823.9	177	0.26	0.14	ST
2”-P-1004-B4-CC	1.5	10	1000/7000	837.5	237	0.02	0.17	ST
2”-P-1005-B4-CC	6.5	10	1000/7000	824	233	0.44	1.2	ST
11/2”-P-1006-B4-CC	6.5	10	1000	824	233	0.49	0.29	ST
3”-P-1007-B4-CC	6	10	6000	824	233	0.15	0.39	-
5”-P-1008-B4-CF	5.5	10	6000	855.7	396	2.1	0.16	CI
8”-P-1009-B4-Ni	0.015	10	484	1.07	0.002	2.1 ·10-4	3.25	-
2”-P-1010-B4-CC	1.5	10	1000/7000	837.5	237	0.021	0.17	ST
2”-P-1011-B4-CC	6.5	10	1000/7000	824	233	0.44	1.2	ST

4.4. Diseño del sistema de control

4.4.1. Descripción funcional de la nueva instalación

El proceso se realiza siguiente las tres etapas que se presentan a continuación

4.4.1.1. Alimentación del Poliol Flexible a D-1001

El Poliol Flexible se encuentra almacenado en el tanque D-1003 a temperatura ambiente, éste es impulsado a través de la bomba G-1003 con una presión de 4kg/cm^{2}g hacia la nueva instalación. Antes de alimentar al lavador de gases, el Poliol Flexible se introduce en el intercambiador E-1001 con el fin de aumentar su temperatura hasta 50ºC. Se ha seleccionado un caudal de entrada de disolvente de 1000 kg/h que se mide a través de FT-1001 y provoca que la válvula FV-1001 abra o cierre en función del valor medido.

Con el fin de regular la temperatura de entrada a D-1001 se utiliza un sistema de control con realimentación (feed-back). Para ello, se mide la temperatura de salida del intercambiador E-1001 con TT-1001 que se compara con el set point de 50ºC, según el error se varía la posición de la válvula TV-1002.

4.4.1.2. Recirculación de poliol flexible a D-1001

En la línea de descarga del lavador de gases D-1001, se encuentra la bomba G-1001A/B que se encarga de impulsar el Poliol Flexible a la cabeza del *Scrubber*. La bomba contiene un variador de frecuencia que regula el caudal con el fin de que el medidor F-1002 marque 1000kg/h. A la entrada de D-1001 se encuentra un medidor de presión PC-1003 que regula la válvula PV-1003 con el fin de que se introduzco a la presión necesaria para las boquillas.

4.4.1.3. Envío de poliol flexible al tanque de solución vinílica

Cada dos horas se alimentan los reactivos al tanque de mezcla de solución vinílica para producir Poliol Polimérico. Este proceso de alimentación se gestiona a través de un programa que abre la válvula XV-1004 y da un set point a FC-1003 que regula el caudal a través de la válvula de control FV-1004. Una vez el FQT compruebe que se ha cargado todo el poliol flexible requerido en la solución vinílica, la secuencia cierra las válvulas XV-1004 y FV-1004. Puesto que la receta para la solución vinílica se debe llevar a cabo a temperatura ambiente, se ha instalado un intercambiador E-1002 para refrigerar el disolvente hasta 20ºC. El caudal de agua de refrigeración a E-1002 será constante.

4.4.2. Listado de elementos de control

A continuación se muestran los listados de instrumentación que intervienen en el proceso.

Tabla 4.11. Listado de las válvulas de control.

Nº Válvula	Línea	Servicio	Tipo Fluido	Corrosivo	Caudal (kg/h)
LV-1001	3”-PF-1002-B4	Entrada Poliol Flexible a E-1001	Poliol Flexible	No	1000
TV-1002	1/2”-VA-1012-B1	Entrada vapor a E-1001	Vapor	No	38
FV-1004	2”-P-1002-B4	Entrada disolvente a E-1002	Poliol Flexible con trazas de SM y ACN	No	6000

Tabla 4.12. Continuación de listado de válvulas de control.

Nº Válvula	Línea	Fase	Temperatura op. (ºC)	Densidad a P,T (kg/m3)	Viscosidad a P,T (cp)	Presión (kg/cm2 r)	Acción Fallo aire
LV-1001	3”-PF-1002-B4	L	20	845	654	4	Cierra
TV-1002	1/2”-VA-1012-B1	V	155	896	0.016	6	Cierra
FV-1004	2”-P-1002-B4	L	31	842	325	6	Cierra

Tabla 4.13. Listado de válvulas de aislamiento.

Nº Válvula	Línea	Servicio	Tipo Fluido	Tipo Válvula	Corrosivo
XV-1001	3”-PF-1002-B4	Entrada Poliol Flexible a E-1001	Poliol Flexible	Bola	No
XV-1002	1/2”-VA-1012-B1	Entrada vapor a E-1001	Vapor	Bola	No
XV-1004	3”-P-1007-B4	Entrada disolvente a E-1002	Poliol Flexible con trazas de SM y ACN	Bola	No

Tabla 4.14. Continuación Listado de válvulas de aislamiento.

Nº Válvula	Línea	Fase	Temperatura op. (ºC)	Densidad a P,T (kg/m3)	Posición Normal	Presión (kg/cm2 r)	Acción Fallo aire
XV-1001	3”-PF-1002-B4	L	20	845	Abierta	4	Cierra
XV-1002	1/2”-VA-1012-B1	V	155	896	Abierta	6	Cierra
XV-1004	3”-P-1007-B4	L	40.7	842	Cerrada	6	Cierra

Tabla 4.15. Listado de instrumentos de temperatura.

Nº instrumento	Servicio	Tipo Fluido	Fase	Corrosivo	Presión Op. (kg/cm^2 r)	Presión Diseño (kg/cm^2r)
TE-1001	2”-PF-1003-B4-CC	Poliol Flexible	L	No	3	10
TE-1002	D-1001	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	1.5	10

Tabla 4.16. Continuación Listado de instrumentos de temperatura.

Nº Instrumento	Línea	Temp. Op (ºC)	Temp. Diseño (ºC)	Situación	Alarma TAH (ºC)	Alarma TAL (ºC)	Enclavamiento
TE-1001	2”-PF-1003-B4-CC	40	60	P	60	40	No
TE-1002	D-1001	32	60	P	60	40	No

Tabla 4.17. Listado de instrumentos de nivel.

Nº instrumento	**Servicio**	**Tipo Fluido**	**Fase**	**Corrosivo**	**Presión Op. (kg/cm^2 r)**	**Presión Diseño (kg/cm^{2}r)**	**Densidad a P,T (kg/m^3)**
LT-1001	D-1001	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	1.5	10	837.5
LSHH-1002	D-1001	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	1.5	10	837.5
LSLL- 1003	D-1001	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	1.5	10	837.5

Tabla 4.18. Continuación de listado de instrumentos de nivel.

Nº instrumento	Línea	Visc. (cp)	Temp. Op (ºC)	Temp.. Dis. (ºC)	Situación	Medida	Alarma Alta (%)	Alarma Baja (%)	Enclavamiento
LT-1001	D-1001	237	40	60	P	Total	-	-	-
LSHH-1002	D-1001	237	40	60	P	Total	91	-	SE-1001
LSLL- 1003	D-1001	237	40	60	P	Total	-	18	SE-1002

Tabla 4.19. Listado de instrumentos de presión.

Nº instrumento	Servicio	Línea	Tipo Fluido	Fase	Corrosivo	Presión Op. (kg/cm^2 r)	Presión Diseño (kg/cm^2r)
PT-1001	D-1001	D-1001	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	1.5	10
PT-1002	G-1001A/B	2”-P-1005-B4-CC	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	6.5	10

Tabla 4.20. Continuación de listado de instrumentos de presión.

Nº instrumento	**Línea**	**Temp. Op (ºC)**	**Temp. diseño (ºC)**	**Situación**	**Medida**	**Elemento**	**Alarma Alta**	**Alarma Baja**	**Enclav.**
PT-1001	D-1001	50	70	P	Absoluta	Indicador	Si	No	No
PT-1002	G-1001A/B	41	60	P	Relativa	Indicador	No	Si	No

Tabla 4.21. Listado de instrumentos de medidores de caudal.

Nº instrumento	**Servicio**	**Línea**	**Tipo Fluido**	**Fase**	**Corrosivo**	**Caudal Op. (kg/h)**	**P Op. (kg/cm^2 r)**
FT-1001	Entrada Poliol Flexible a E-1001	3”-PF-1002-B4	Poliol Flexible	L	No	1000	5
FT-1002	Recirculación a D-1001	1 $^{1/2}$”-P-1006-B4-CC	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	1000	6.5
FT-1003	Entrada Poliol Flexible con ACN y SM a E-1002	2”-P-1007-B4	Poliol Flexible con trazas ACN y SM	L	No	6000	6.5

Tabla 4.22. Continuación de listado de instrumentos de medición de caudal.

Nº instrumento	**Temp.a Op (ºC)**	**Densidad a P,T (kg/m^3)**	**Visc. a P,T (cp)**	**Z**	**Tipo**	**Situación**	**SP (kg/h)**	**Alarma**	**Enclav.**
FT-1001	20	845.2	654.2	0.742	Coriolis	P	1000	No	No
FT-1002	41	842.1	233.4	0.870	Coriolis	P	1000	No	No
FT-1003	41	842.1	233.4	0.870	Coriolis	P	6000	No	No

4.5. Diseño de equipos

En los siguientes apartados se encuentran las hojas de especificación de los diversos equipos presentes en la nueva instalación

4.5.1. Hoja de especificación del lavador de gases D-1001

El equipo D-1001 se trata de un lavador de gases junto con un depósito de almacenamiento de poliol flexible en la base. La absorción se lleva a cabo mediante una primera etapa de pulverización de poliol flexible a través de boquillas *Whirljet tipo BX* (ver anexo A.2.2) que cubre un área de 0.5 m^2. Posteriormente se encuentra un relleno tipo *M252.Y* (ver anexo A.2.1) de 3 m de altura, con un grosor de 1mm debido a la alta viscosidad. En cuanto a la primera etapa se le atribuye una pérdida de carga a la corriente gaseosa prácticamente despreciable, mientras que la segunda etapa produce una pérdida de carga de 3.65mbar por cada metro de relleno.

Encima de las boquillas, la torre consta de un eliminador de neblinas (demister) que se encarga de captar las gotas de líquido arrastradas por la corriente gaseosa. Se ha seleccionado un eliminador de nieblas tipo FLEXICHEVRON (Ref. 14), que aunque su coste de instalación es más elevado que los eliminadores de nieblas de malla, este tipo trabaja mejor con nieblas que contienen partículas viscosas o líquidos espesos.

El lavador de gases tiene dos alimentaciones de venteos, para separar los de menor presión procedentes del tanque de almacenamiento y los equipos flash, de los venteos de mayor presión procedentes de los tanques de solución vinílica. Los primeros venteos mencionados se inyectarán entre la tapa de pulverización y relleno, produciéndose la absorción de estireno únicamente con el contacto del poliol flexible pulverizado por las boquillas. En cuanto a los venteos procedentes de los tanques de solución vinílica, al tener una ΔP disponible mayor, se inyectarán por debajo del relleno para que la absorción de estireno con poliol flexible se produzca en ambas etapas, relleno y pulverización.

Con tal de conseguir una distribución homogénea (Ref. 15) del poliol flexible a todas las boquillas de pulverización y que abarque toda la sección de la columna, se requerirá un distribuidor de líquidos (ver figura 4.23.). En el caso de los venteos, también se ha seleccionado un distribuidor de gases para distribuirlos por toda la sección equitativamente. Para los venteos de baja presión se ha seleccionado un distribuidor de placas (ver figura 4.24.) que son utilizados cuando el impulso de entrada de gas son pequeños. Por otro lado, para los venteos de mayor presión, se ha seleccionado un distribuidor de chimenea (ver figura 4.24.).

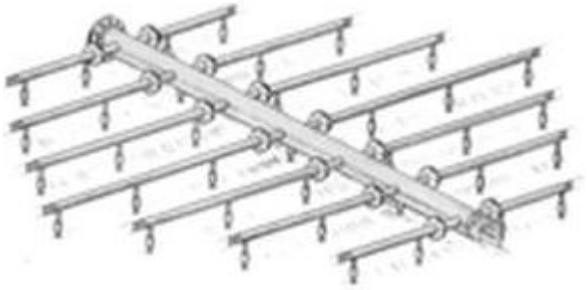


Figura 4.23. Distribuidor de líquido.

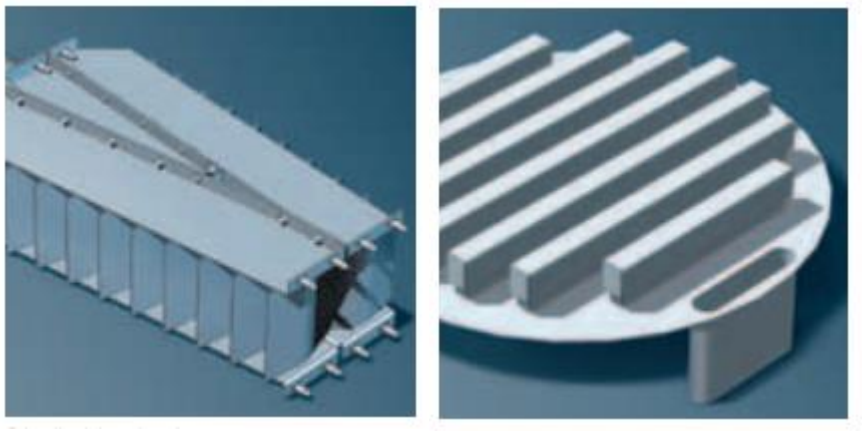


Figura 4.24. Distribuidor de gas tipo placas y chimenea.

Se ha dimensionado el depósito de 6m^3 de volumen para que sea capaz de almacenar hasta cinco horas un caudal de alimentación de 1000kg/h. Por otro lado, el tanque se ha diseñado con una recirculación del disolvente que se inyecta entre la etapa de pulverización y el relleno.

El material utilizado ha sido seleccionado por el suministrador Sulzer que ha recomendado el acero inoxidable 316L. Respecto a las condiciones de diseño, el lavador de gases se ha diseñado a una presión de 10 bar y temperatura de70ºC.

El lavador de gases está controlado por medidores de nivel temperatura y presión aparte de alarmas de alto y bajo nivel. Al ser un producto viscoso, los medidores de nivel serán tipo radar. Con tal de mantener la temperatura de 50ºC del poliol flexible, el depósito dispondrá de un relleno de lana de roca con una placa de aluminio con tal de evitar corrosión bajo el aislamiento. Finalmente, el equipo se encontrará en un cubeto para aislarlo en caso de fuga con detectores de explosividad y alarmas de emisiones.

PROYECTO	TFGEQ_1911_amgalv	ESPECIFICACIÓN	Nº	D-1001
			HOJA Nº	1 de 3
EMPRESA	Repsol Química	**Columna**	FECHA	26-03-19
FÁBRICA			PREPARADO	AG
PLANTA	Polioles Poliméricos	**EMPRESA**	REVISADO	
			APROBADO	
ÍTEM			Nº UNIDADES	1
SERVICIO	Lavador de venteos de la plana de Polioles poliméricos			

OPERACIÓN

DESCRIPCIÓN		Absorber los contaminantes de las corrientes de venteos
PRODUCTO		N2 con trazas de ACN y SM. Disolvente: Poliol Flexible
TEMPERATURA	ºC	50,00
PRESIÓN	kg/cm2g	1,50
DENSIDAD	kg/m3	837,50

CONSTRUCCIÓN

DIMENSIONES	DIÁMETRO		m
	LONG. / ALT.	7,50	m
	ESPESOR	3,30	mm
FONDOS	SUPERIOR	-	
	INFERIOR	Elipsoidal	
VOL. / PESO	VOL. ÚTIL		m3
	VOL. TOTAL	9,17	m3
	PESO	72.993,00	kg
INSTALACIÓN			
AISLAMIENTO		Lana de Roca	
PINTURA			

DISEÑO Y PRUEBA

CÓDIGOS	ASME		
CONDICIONES DE DISEÑO	TEMPERAT.	70	ºC
	PRESIÓN	10	kg/cm2g
	DENSIDAD		kg/m3
PRESIÓN DE PRUEBA	HIDRAÚLICA	0,41	MPa
	NEUMÁTICA		
ESPESOR DE CORROSIÓN		3	mm
EFICACIA DE SOLDADURA		0,85	
ALIVIO DE TENSIONES			
RADIOGRAFIADO		Parcialmente	

MATERIALES

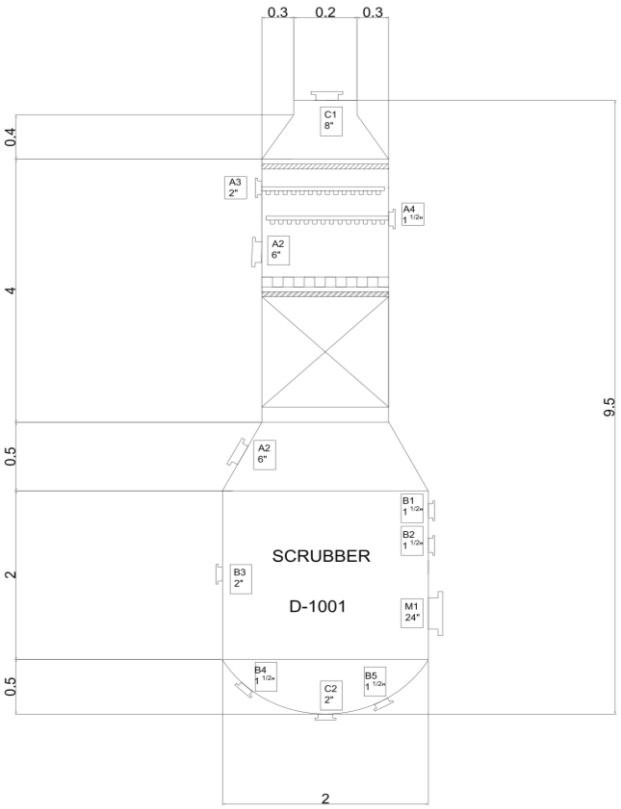
	DESCRIPCIÓN	COMENTARIOS
CUERPO	SA-316L	
FONDOS	SA-316L	
BRIDAS CUERPO	SA-105	
VALONA BRIDAS CUERPO		
BRIDAS TUBULADUR.	SA-105	
TUBULADURAS		
PLACA PARTICIÓN		
CORTACORRIENTES		
SOPORTES PARA INTERNOS	SA-516 Gr60	
TORNILLOS/TUERCAS INT.		
JUNTAS EXTERNAS		
SOPORTES EXTERIORES	SA-516 Gr60	
INTERNOS - Relleno		

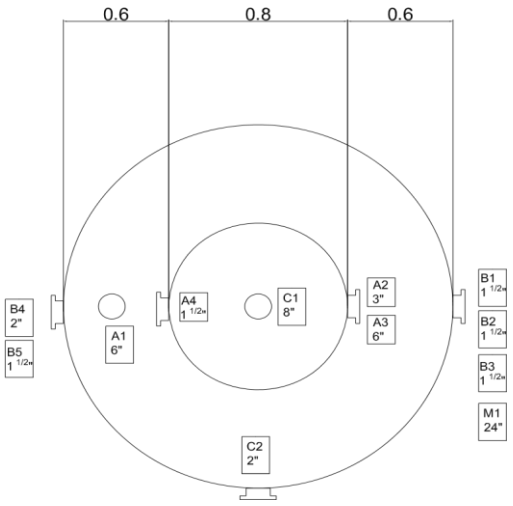
MARCA	CANT.	SERVICIO	D.N	RATING
C1	1	Salida vapor	8"	
C2	1	Salida fondo	2"	
A1	1	Entrada venteos almacen SM	6"	
A2	1	Entrada venteos solución vinílica	6"	
A3	1	Entrada disolvente freso	2"	
A4	1	Entrada disolvente recirculación	1 1/2"	
M1	1	Boca de hombre	24"	
B1	1	Tramsmisor de presión	1 1/2"	
B2	1	Transmisor de alto nivel	1 1/2"	
B3	1	Medidor de nivel	2"	
B4	1	Transmisor bajo nivel	1 1/2"	
B5	1	Tramsmisor de temperatura	1 1/2"	

NOTAS

PROYECTO		ESPECIFICACIÓN	Nº	
			HOJA Nº	2 de 3
EMPRESA		**Columna**	FECHA	
FÁBRICA			PREPARADO	
PLANTA		**EMPRESA**	REVISADO	
			APROBADO	
ÍTEM			Nº UNIDADES	
SERVICIO				

Sketch Alzado/Planta





PROYECTO	TFGEQ_1911_amgalv	ESPECIFICACIÓN		Nº	D-1001
				HOJA Nº	3 de 3
EMPRESA	Repsol Química	**Columna**		FECHA	26-03-19
FÁBRICA				PREPARADO	AG
PLANTA	Polioles Poliméricos	**EMPRESA**		REVISADO	
				APROBADO	
ÍTEM				Nº UNIDADES	1
SERVICIO	Lavador de venteos de la plana de Polioles poliméricos				

Secciones							
LECHOS							
NUMERO DE ETAPAS TEÓRICAS			5				
RELLENO/PLATOS			Spray/ Relleno				
Tipo							
DIAMETRO INTERNO COLUMNA		mm	800				
DISTANCIA ENTRE PLATOS		mm					
ALTURA TOTAL RELLENO		mm	4				
NTS/ m relleno Instalado/Requerido							
CONDICIONES OPERACIÓN			Fondo	Cabeza			
PRESION		kg/cm2g	2,2	1,20			
TEMPERATURA		ºC	40,0	50,00			
LÍQUIDO	CAUDAL	kg/h	1.000,0	1.000,00			
	DENSIDAD	kg/m3	837,5	824,00			
	VISCOSIDAD	cP	237,5	177,00			
	TENS. SUPERF.	N/m	19,0	18,00			
	PESO MOLECULAR		2.941,0	3.055,00			
VAPOR	CAUDAL	kg/h	480,0	481,00			
	DENSIDAD	kg/m3	2,3	1,32			
	VISCOSIDAD	cP	0,02	0,02			
	PESO MOLECULAR		28,1	28,14			
RANGO DE OPERACIÓN							
Líquido		% Normal					
Vapor		% Normal					
PORCENTAJE INUNDACION		%					
PORCENTAJE CAPACIDAD		%					
PERDIDA DE CARGA		g/cm2g	0,1				
MATERIALES	COLUMNA (CUERPO)		Polipropileno				
	RELLENO		M252.Y				
	DISTRIBUIDORES						

4.5.2. Hoja de especificación de los intercambiadores E-1001 y E-1002

Se han seleccionado los intercambiadores de placas (PHE) para esta instalación debido a que son los más apropiados para trabajar con fluidos de alta viscosidad. A continuación se presenta una tabla comparativa entre los intercambiadores de placas e intercambiadores de tubo y carcasa para respaldar la elección (Ref. 8).

Tabla 4.23. Comparación entre intercambiadores de placas e intercambiadores de carcasa y tubos.

Comparación	**Tubo y carcasa**	**PHE**
Área de transferencia de calor	Grande	Muy grande
Costos básicos	Altos	Bajos
Mantenimiento	-Difícil inspeccionar. -Reparaciones aceptables. -Limpieza química muy buena por la carcasa y aceptable por los tubos. -Limpieza mecánica imposible	-Completamente accesible para inspección, limpieza química y manual. -Fácil reemplazo de todas sus partes
Limitaciones de espacio y peso	Requiere espacio considerable y además un espacio amplio para mantenimiento.	Ligeras y ocupan poco espacio. No requieren de espacio adicional para mantenimiento.
Temperatura de operación	No tiene restricciones especificas	32 a 66 ºC usando empacaduras de caucho. -40 a 127 ºC usando empacaduras de asbesto comprimido.
Caída de presión	Baja	Alta
Aplicaciones	-Intercambio líquido-líquido -Calentamiento de vapores Condensación -Rehervidores de baja a media viscosidad y bajo ensuciamiento.	-Intercambio líquido-líquido. -Calentamiento de vapores a baja presión. -Plantas de enfriamiento en corrientes de procesos. -Operaciones con fluidos muy corrosivos, de cualquier

	viscosidad o ensuciamiento medio. -Para expansiones programadas.

En este apartado se han plasmado las hojas de especificación de los intercambiadores E-1001 y E-1002 respectivamente. Para realizar dichas hojas de especificación, se hizo uso de la herramienta de *Aspen Exchanger Desing*- Posteriormente se compararon con los resultados obtenidos en la simulación de *Hysys* con diferencias no significativas.

Plate Heat Exchanger Specification Sheet					
Company:	REPSOL				
Location:	Tarragona				
Service of Unit:	Calentar el poliol flexible a 50ºC antes de la unidad D-1001				
Item No:	E-1001				
Date:	18/05/2019				
CASE		HOT SIDE		COLD SIDE	
Fluid		Agua		Poliol Flexible	
Total flow	kg/h	38		1000	
Flow per PHE	kg/h	38		1000	
Pressure drop (allow./calc.)	bar	0,5 / 0,00172		0,43 / 0,18	
Velocity between plates	m/S	1,78		0,1	
Wall shear stress	psi	0,0002		0,0063	
Fouling margin	%				
OPERATING DATA		**INLET**	**OUTLET**	**INLET**	**OUTLET**
Liquid flow	kg/h	0	38	1000	1000
Vapor flow	kg/h	38	0	0	0
Operating temperature	ºC	158	148	20	50
Operating pressure	bar	5	4,99	4,3	4,12
LIQUID PROPERTIES					
Density	kg/m3		918,51	845,2	824
Sprecific heat	KJ/(kg·K)		4,242	17,36399781	18,83640343
Viscosity	cp		0,1986	654	177
Thermal conductivity	W/(m·K)		0,6895	0,0402	0,0386
Surface tension	N/m		0,0488	0,0198	0,01834
VAPOR PROPERTIES					
Density	kg/m3	2,57			
Specific heat	KJ/(kg·K)	2,335			
Viscosity	cp	0,0144			
Thermal conductivity	W/(m·K)	0,0306			
Relative molecular mass		18,0099			
Dew point/ bubble point	ºC	151,98 / 151,96			
Latent heat	KJ/kg	2100,4			
Critical pressure	bar	221,05974			
Critical temperature	ºC	374,13			
Total heat exchanged	KW	22,7			
Overall coefficient (UA)	W/(m2·K)	Clean conditions:	1021,9	Service:	1021,9
LMTD/Effective MTD	ºC	117,71 / 116,3			
Heat transfer area	m2	0,5			
Stream heat transfer coeff.	W/(m2·K)	6844,7		1254,7	
CONFIGURATION FOR EXCHANGER AND PLATE DETAILS					
Number of PHE in parallel	1	Heat transfer area/PHE	m2		0,5
Numer of passes. Hot side	1	Heat transfer area/plate	m2		0,057
Number of passes. Cold side	1	Plate chevron angles(s)	Degrees		45
Number of plates per PHE	11	Nominal plate thickness	mm		0,6
		Nominal plate gap	mm		3.5
Mass empty/ full lb	10 / 143				
Remarks					

Plate Heat Exchanger Specification Sheet					
Company:	REPSOL				
Location:	Tarragona				
Service of Unit:	Enfriar a 20ºCPoliol Flexible con trazas de SM y ACN procedente de D-1001				
Item No:	E-1002				
Date:	18/05/2019				
CASE		**HOT SIDE**		**COLD SIDE**	
Fluid		Poliol Flexible		Agua	
Total flow	kg/h	6000		2500	
Flow per PHE	kg/h	6000		2500	
Pressure drop (allow./calc.)	bar	0,64 / 0,3		0,32 / 0,036	
Velocity between plates	m/S	0,02		0,1	
Wall shear stress	psi	0,0066		0	
Fouling margin	%	0		0	
OPERATING DATA		**INLET**	**OUTLET**	**INLET**	**OUTLET**
Liquid flow	kg/h	6000	6000	2500	2500
Vapor flow	kg/h	0	0	0	0
Operating temperature	ºC	40,67	20	6	38
Operating pressure	bar	6,4	6,1	3,2	3,2
LIQUID PROPERTIES					
Density	kg/m3	842	856	62,32	62,13
Sprecific heat	KJ/(kg·K)	12,97073366	16,71712566	1,003	1,0003
Viscosity	cp	233,4	590	1,5	0,68
Thermal conductivity	W/(m·K)	0,0414	0,0426	0,33	0,36
Surface tension	N/m	0,019	0,02	0,005	0,005
VAPOR PROPERTIES					
Density	kg/m3				
Specific heat	KJ/(kg·K)				
Viscosity	cp				
Thermal conductivity	W/(m·K)				
Relative molecular mass					
Dew point/ bubble point	ºC				
Latent heat	KJ/kg				
Critical pressure	bar			221	
Critical temperature	ºC			374,1	
Total heat exchanged	KW	93			
Overall coefficient (UA)	W/(m2·K)	Clean conditions:	297,3	Service:	297,3
LMTD/Effective MTD	ºC	6,88 / 6,88			
Heat transfer area	m2	21,1			
Stream heat transfer coeff.	W/(m2·K)	445,8		924,5	

CONFIGURATION FOR EXCHANGER AND PLATE DETAILS				
Number of PHE in parallel	1	Heat transfer area/PHE	m2	21,1
Numer of passes. Hot side	1	Heat transfer area/plate	m2	0,057
Number of passes. Cold side	1	Plate chevron angles(s)	Degrees	30
Number of plates per PHE	369	Nominal plate thickness	mm	0,6
		Nominal plate gap	mm	3.5
Mass empty/ full lb		334 / 468,8		
Remarks				

4.5.3. Hoja de especificación de las bombas G-1001A/B

Se ha seleccionado una bomba de desplazamiento positivo puesto que a diferencia de las máquinas centrífugas, pueden trabajar satisfactoriamente con bajas velocidades y en la mayoría de los casos son relativamente insensibles al efecto de la viscosidad del fluido. A continuación se plasman dos ilustraciones (Ref. 9) en las que se corrobora que la eficiencia de una bomba centrífuga para un fluido tan viscoso como es el poliol flexible tendría un valor por debajo del 50%.

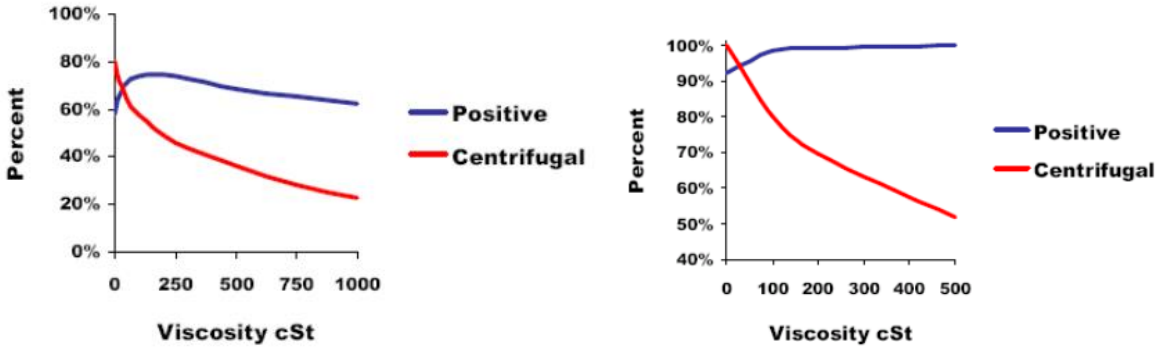


Figura 4.25. Influencia de la viscosidad en las bombas centrifugas y de desplazamiento positivo.

Posteriormente se determinó que dentro del marco de bombas de desplazamiento positivo el tipo más idóneo son las bombas de engranajes.

Para determinar la presión a la que debe trabajar la bomba, se ha de establecer la presión a la que se desea que llegue al punto final y la perdida de carga que debe de vencer durante el recorrido.

El caudal que circula por la bomba es variable, ya que cada dos horas durante 25 minutos, se ha de alimentar poliol flexible a la solución vinílica. Por lo tanto, la bomba ha de ser capaz de impulsar 1000kg/h a la recirculación y 6000kg/h al tanque de mezcla de reactivos. Debido a esto, se ha instalado un variador de frecuencia a la bomba para que trabaje en el punto óptimo en ambos casos.

Teniendo en cuenta los datos de caudal operación, viscosidad del fluido y presión requerida, se ha buscado en catálogos (Ref. 10) de bombas una que se adecuara a las necesidades (Ver A.3). Dicho esto se ha elegido el fabricante de bombas *HASA* con su modelo de bomba serie F Electrobombas de engranajes monobloc.

ESPECIFICACIÓN DE INGENIERÍA BÁSICA					
		Equipo nº		G-1001A/B	
		Pág	1	de	1
		Rev.			
BOMBAS					
EQUIPO Nº OPERACIÓN / RESERVA		G-1001 A/B			
Nº REQUERIDO		2 (1 en servicio y 1 en reserva)			
TIPO DE BOMBA		Desplazamiento positivo (engranajes)			
TIPO DE ACCIONAMIENTO		Motor eléctrico			
TIPO DE FUNCIONAMIENTO (CONT./DISCONT.)		continuo			
SERVICIO		Impulsión Poliol Flexible a recirculación de D-1001 y solucón vinílica			
DATOS GENERALES DE OPERACIÓN					
FLUIDO BOMBEADO		Poliol Flexible con trazas de ACN y SM			
COMPONENTES CORROSIVOS	(sí/no)	NO			
COMPONENTES TÓXICOS	(sí/no)	NO			
SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	%p / mm	NO			
PESO ESPECIF. 15ºc Y 1 ATM A		8385,86			
TEMP. BOMBEO MÍN/NORM/MAX.	ºC	40/41			
VISCOSIDAD @ T/Tmín	cP	237			
CONDICIONES DE ASPIRACIÓN E IMPULSIÓN					
PR. OPERACIÓN EN ASPIRAC. NORMAL	kg/cm2 r	2,2			
PR. VAPOR @ TBOMBEO	kg/cm2 a	NP			
PESO ESPECÍFICO @T,P ASPIRAC.		8207,5			
N.P.S.H. DISPONIBLE	m	18,2			
PR. OPERAC. EN ASPIRACIÓN MÁX.	kg/cm2 r	2,2			
PR. OPERACIÓN EN IMPULS. NORMAL	kg/cm2 r	6,5			
DATOS DE PROYECTO HIDRÁULICOS					
PRESIÓN DIFERENCIAL	kg/cm^2	5			
ALTURA DIFERENCIAL	m	6			
CAUDAL NORMAL@TBOMBEO	m^3/h	1			
CAUDAL MÁX @TBOMBEO	m^3/h	8			
DATOS DE PROYECTO MECÁNICOS					
POTENCIA BOMBA	C.V	2			
CONSUMO BOMBA	KW	1,6			
DIÁMETRO TUBERÍA ASPIRAC/IMPULSIÓN	inch	1			
SERIE BRIDAS LÍNEA ASPIRAC/IMPULS.					
TIPO DE CIERRE		Doble cierre mecánico			
Ensuciamiento de líquido bombeado permis	(sí/no)	NO			
Infiltración de aire permisible	(sí/no)	NO			
AISLAMIENTO/ACOMPAÑAMIENTO/ENCAMISADO		NO			
TIPO DE FLUIDO CALEFACTOR		-			
PRESIÓN	kg/cm^2 r	-			
TEMPERATURA	ºC	-			
BOMBA VOLUMÉTRICA					
REGULACIÓN DE CAUDAL		Si			
¡continuo, Continuo / Manual, Automát		Continuo/Continuo			
Sistema		Variador de frecuencia			
Rango, %					
Precisión a caudal mínimo					
NOTAS:					

5. SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

Para valorar el riesgo de seguridad y medio ambiente en Repsol, se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa basada en el riesgo. Se basan en los métodos HAZOP y CEL (Consecuencias, Exposición y Probabilidad) respectivamente. Por un lado, estudio HAZOP consiste un examen detallado de la instalación para evaluar los riesgos de la operación no previstos en el diseño o por un mal funcionamiento de los equipos que produce consecuencias en el proceso. Por otro lado, el método CEL se basa en la fórmula 5.1, dónde los valores de Exposición, Probabilidad y Consecuencia se extraen de diferentes matrices.

Riesgo = Exposición x Probabilidad x Consecuencia Ec. (5.1.)

La matriz Exposición determina la frecuencia con la que podría ocurrir el evento iniciador, la matriz Probabilidad hace referencia a la probabilidad de que, una vez desarrollado el evento iniciador, se alcance una determinada consecuencia y finalmente la matriz Consecuencias hace referencia tal y como su nombre indica a los posibles daños referidos a personas, propiedad y medio ambiente si se llega a producir el riesgo.

En función del valor obtenido en la evaluación del riesgo, se realiza una clasificación del mismo:

Tabla 5.1. Nivel de riesgo.

R= C x E x L	**Nivel de riesgo**	**Medidas preventivas adicionales**
$R \leq 14$	Menor	No necesarias
$14 < R \leq 35$	Moderado	Necesario para minimizar riesgo
$35 < R \leq 82$	Alto	Necesario para minimizar riesgo
$R > 82$	Urgente	Valor no tolerable. No se realizará la actividad

A continuación se muestra el HAZOP del *Scrubber* D-1001. A partir de las acciones a implantar surgidas durante el estudio, se ha modificado el P&ID (ver apartado 4.2.3) incorporando alarmas y enclavamientos del apartado 5.2.

5.1. *Hazard and operability*

Company: Repsol
Facility: Complejo industrial de Tarragona

Session: 05/04/2019
Node: Scrubber D-1001

Intention: Recibir los venteos de la planta y absorver las trazas de ACN y SM a través de Poliol Flexible. El Poliol Flexible llega desde el tanque D-1003 mediante la bomba G-1003 con PD= 4.1kg/cm2. Este se recircula desde el fondo a la alimentación de D-1001 a través de la bomba G-1001 con PD=6.5. Cuando la master de solución vinílica da señal, se abre la valvula CV-1004 que envia el Poliol Flexible a el tanque de solución vinílica.

PG	Desviación	Causas	Escenario	Consecuencias	Salvaguardas	Consecuencias	Exposición	Probabilidad	Riesgo	Acciones	Por	Comentarios
Más	1. Más Nivel	1.1 Fallo LC-1001 marcando menos nivel que el real, con XV-1004 cerrada y abriendo LV-1001	1.1.1 Sobrellenado D-1001 y Sobrepresión. Fuga por bridas, juntas. Fuga de Poliol Flexible con ACN y SM con riesgo de incendio o explosión.	Daños a personas	1.1.1.1 Enclavamiento por muy alto nivel SE-1001 activado por LSHH-1001, Cierra XV-1001.	3	1,2	0,3	1,08			
				Daños a instalaciones	1.1.1.2 Detectores de explosividad en el cubeto	3	1,2	0,3	1,08			
				Daños medioambientales	1.1.1.3 alarma emisiones	3	1,2	0,3	1,08			
		1.2 Parada de la bomba G-1001A/B	1.2.1 Parada de la bomba G-1001A/B	Daños a personas	1.2.1.1 Enclavamiento por muy alto nivel SE-1001 activado por LSHH-1001, Cierra XV-1001 y alarma por bajo nivel en FT-1002.	3	2,5	0,3	2,25			
				Daños a instalaciones	1.2.1.2 Detectores de explosividad en el cubeto	3	2,5	0,3	2,25			
				Daños medioambientales	1.2.1.3 alarma emisiones	3	2,5	0,3	2,25			

Menos	2. Menos nivel	2.1 Fallo LI-1001, Cierra LV-1001 con XY-1004 abierta	2.1.1 Bajo nivel D-1001, No se absorbe las trazas SM y ACN	Daños medioambientales	2.1.1.1 Enclavamiento muy bajo nivel SE-1002 activado por LSLL-1001, para bomba G-1001A/B	3	1,2	0,6	2,16			Posibles emisiones por encima de los VLE's
			2.1.2 Daños en la bomba	Daños instalaciones		1,4	1,2	0,6	1,008			Riesgo de cavitación de las bombas G-4234A/B. Riesgo de fuga de poliol con presencia de ACN y/o SM.
				Daños a personas		1,4	1,2	0,6	1,008			
		2.2 Fallo FT-1003, Contabiliza menos caudal	2.2.1 Disminuye el nivel en D-1001. Mitigado por LT-1001, abre LV-1001									
Más	3. Más Caudal Poliol a D-1001	3.1 Fallo FT-1001 marca menos caudal, Abre FC-1001	3.1.1 Mitigado por lazo de control LZSL-1001									
	4. Más Caudal Venteos a D-1001	4.1 Llegada de más venteos del proceso	4.1.1. Sin consecuencias adversas									Se ha diseñado el scrubber para caudal máximo de venteos.
	5. Más caudal Vapor a E-1001	5.1 Fallo TT-1001, marca menos temperatura	5.1.1 Aumento de la temperatura del Poliol Flexible, disminuación de la absorción de monomeros en los venteos.	Daños medioambientales	5.1.1.1 Alarma alta temperatura de D-1001 en TT-1002	3	1,2	0,6	2,16			
	6. Más caudal Agua refrigeración a E-1002	6.1. Fallo instalaciones externas al nodo	6.1.1 Disminución de la temperatura de Poliol Flexible a solución vinílica	Sin consecuencias adversas								Solución vinílica tiene su propio servicio de control de temperatura
Menos	7.Menos caudal Poliol Flexible a D-1001	7.1 Fallo FT-1001 marca más caudal, Cierra CV-1001	7.1.1 Bajo caudal de disolvente, aumento de la concentración de monómeros en la cabeza D-1001.	Daños medioambientales	7.1.1.1 Mismo salvaguardas que 2.1.1.1	3	1,2	0,3	1,08			Emisiones por encima de los VLE's
				Daños a instalaciones		1,4	1,2	0,3	0,504			
	8. No caudal Poliol Flexible a D-1001	8.1 Fallo instalaciones externas al nodo	8.1.1 Aumento de la concentración de monómeros a la cabeza de D-1001	Daños medioambientales	8.1.1.1 Mismo salvaguardas que 1.2.1.3	3	1,2	0,3	1,08			Emisiones por encima de los VLE's
			8.1.2 Daño a bomba G-1001	Daños a instalaciones	8.1.2.2 Mismo salvaguardas que 7.1.1.1	1,4	1,2	0,3	0,504			

Menos	9. Menos caudal Vapor a E-1001	9.1 Fallo TT-1001, marca más temperatura	9.1.1 Disminución de la temperatura Poliol Flexible a D-1001. Aumento de la viscosidad del disolvente. Posible taponamiento de las boquillas	Daños medioambientales	9.1.1.1 Alarma baja temperatura de D-1001 en TT-1002	3	1,2	0,6	2,16			Emisiones por encima de los VLE's
	10. Menos caudal Agua refrigeración a E-1002	10.1 Fallo instalaciones externas al nodo	10.1.1 Aumento de la temperatura de Poliol Flexible a Solución vinílica	Sin consecuencias adversas								Solución vinílica tiene su propio servicio de control de temperatura
Más	11. Más Temperatura en D-1001	11.1 Más temperatura entrada Poliol Flexible. Fallo TI-1001, Abre TV-1002	11.1.1 Aumento de la temperatura del disolvente, disminuación de la absorción de monomeros en los venteos.	Daños medioambientales	11.1.1.1 Mismo salvaguardas que 5.1.1.1	3	1,2	0,6	2,16			
		11.2 Fuego externo	11.2.1 No se identifican consecuencias adversas									El Poliol Flexible no vaporiza por lo que no hay riesgo en este escenario
Menos	12. Menos temperatura D-1001	12.1 Menos temperatura entrada Poliol Flexible, Cierra TV-1002	12.1.1 Disminución de la temperatura. Aumento de la viscosidad del disolvente. Posible taponamiento de las boquillas	Daños medioambientales	12.1.1.1 Mismo salvafuardas que 10.1.1.1	3	1,2	0,6	2,16			Emisiones por encima de los VLE's
Más	13. Más presión en D-1001	13.1 Fuego externo	13.1.1 No se identifican consecuencias adversas									El Poliol Flexible no vaporiza por lo que no hay riesgo en este escenario
		13.2 Fallo LC-1001 marcando menos nivel que el real, con XV-1004 cerrada y abriendo LV-1001	13.2.1 Sobrellenado D-1001 y Sobrepresión. Fuga por bridas, juntas. Fuga de Poliol Flexible con ACN y SM con riesgo de incendio o explosión.	Daños a personas	13.2.1.1 Mismo salvaguardas que 1.1.1.1	3	1,2	0,3	1,08			
				Daños a instalaciones	13.2.1.2 Mismo salvaguardas que 1.1.1.2	3	1,2	0,3	1,08			
				Daños medioambientales	13.2.1.3 Mismo salvaguardas que 1.1.1.3	3	1,2	0,3	1,08			
		13.3 obstrupción de Demister	13.3.1 Aumento de la presión de D-1001 hasta alcanzar la presión del colector de venteos.	Daños a instalaciones	13.3.1. Alarma alta presión de D-1001 en PT-1001	3	1,2	0,6	2,16			Retención de venteos

Más	14. Más composición Monómeros en emisiones	14.1 Saturación de Poliol Flexible	14.1.1 Emisiones superiores VLE's	Daños memdioambientales	14.1.1.1 Alarma altas concentraciones de monomeros del Poliol flexible en Analizador impulsión bomba	3	0,6	0,6	1,08			
Menos		14.2 Bajo caudal de Poliol Flexible	14.2.1 Emisiones superiores VLE's	Daños memdioambientales	14.2.1.1 Alarma altas emisiones en analizador de monomeros en cabeza D-1001. Aumentar caudal Poliol Flexible	3	1,2	0,6	2,16			
No	15. No servicio	15.1 Aire	15.1.1 Fallo de las valvulas.		15.1.1.1 Actuación de las valvulas en modo seguro		1,2		0			
		15.2 Agua	15.2.1 Aumento de la tempratura de Poliol Flexible a Solución vinílica	Sin consecuencias adversas								Solución vinílica tiene su propio servicio de control de temperatura
		15.3 Vapor baja presión	15.3.1 Aumento de la temperatura del disolvente, disminuación de la absorción de monomeros en los venteos.	Daños medioambientales	15.4.1.1 Mismo salvaguardas que 5.1.1.1	3	1,2	0,6	2,16			
		15.4 Nitrogeno	15.4.1 Sin consecuencas adversas									

5.2. Enclavamientos de la instalación

Tabla 5.2. Enclavamientos del nodo D-1001.

Enclavamiento	Descripción	Actuado por	Actuación	P&ID
SE-1001	Muy alto nivel en D-1001 (Scrubber)	El enclavamiento se activa cuando hay muy alto nivel en el Scrubber D-1001 durante 3 segundos. Mediante: LSHH-1002	Se cierra la válvula XV-1001 de entrada al depósito D-1001	U-22077-A-9962 H16B
SE-1002	Muy bajo nivel en D-1001 (Scrubber)	El enclavamiento se activa cuando hay muy bajo nivel en el Scrubber D-1001 durante 3 segundos. Mediante LSLL-1003	Se para la bomba G-1001A/B	U-22077-A-9962 H16B

6. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL DE LA INSTALACIÓN

6.1. Emisiones

Actualmente existen unos valores límites establecidos (VLE) según la Declaración de Impacto Ambiental (publicada en el DOGC núm. 3558 de 22 de enero de 2002) en D-1002. Dichos valores no se pueden publicar por confidencialidad.

Las emisiones se calculan en medias horarias a partir de datos minutales previamente corregidos a base seca con intervalo de confianza. De igual manera se calculan medias diarias a partir de las medias horarias.

Se considera que cumplen los VLE´s si se verifican las siguientes condiciones:

- El 97% de las medidas horarias no superan los VLE´s
- Ninguna media diaria supera los VLE's

La asociación medioambiental se encuentra en periodo de revisión de los valores límites y es posible que sean reducidos en un futuro próximo. A continuación se presenta en la tabla 6.2. el porcentaje de reducción más estricto de los valores límites establecidos respecto los anteriores.

Tabla 6.2 Nuevos valores límite establecidos para los productos de la planta de poliol polimérico.

Parámetro	**Concentración**	**Flujo másico**
Acrilonitrilo (1)	60%	60%
Estireno (2)	50%	75%

A continuación se han representado las emisiones de estireno (ver figura 6.2.) y acrilonitrilo (ver figura 6.1.) junto con los valores límites establecidos gracias a los valores extraídos de Aspen Process Explorer. Los valores de los ejes se han omitido por confidencialidad de la empresa.

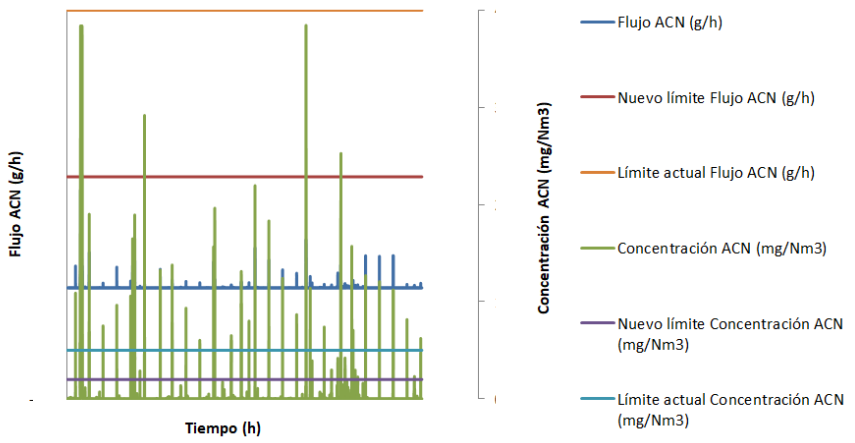


Figura 6.1 Emisiones Acrilonitrilo del 5 de julio al 31 de diciembre del 2018.

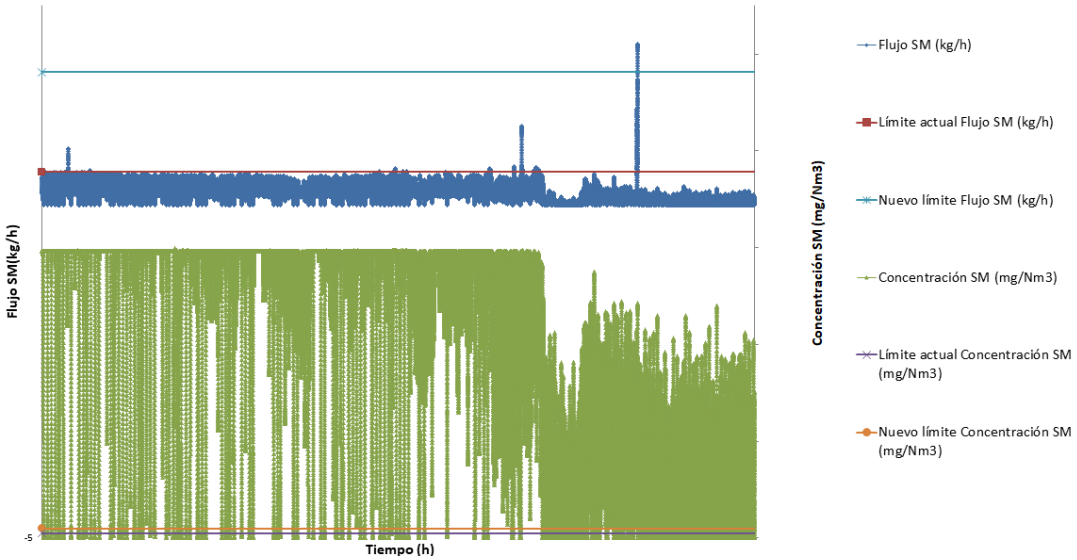


Figura 6.2 Emisiones Estireno del 5 de julio al 31 de diciembre del 2018.

Como se observa en ambas figuras las concentraciones siempre se encuentran por encima de los límites. Concretando en el caso de Acrilonitrilo, el valor del flujo siempre se encuentra dentro de los límite por lo que el *Scrubber* D-1002 es suficiente para controlar los venteos que contengan Acrilonitrilo. Por otro lado, en el caso del flujo de Estireno, se observa que con los nuevos valores establecidos por Autorización Ambiental se estaría trabajando próximos al límite.

Con el fin de optimizar las nuevas líneas del proceso se ha realizado un estudio de las emisiones para determinar qué depósitos son los que realizan mayores venteos. Reduciendo el periodo de tiempo de la figura 6.3 se obtiene la figura 6.4 en la cual, se observa que las emisiones son un ciclo constante.

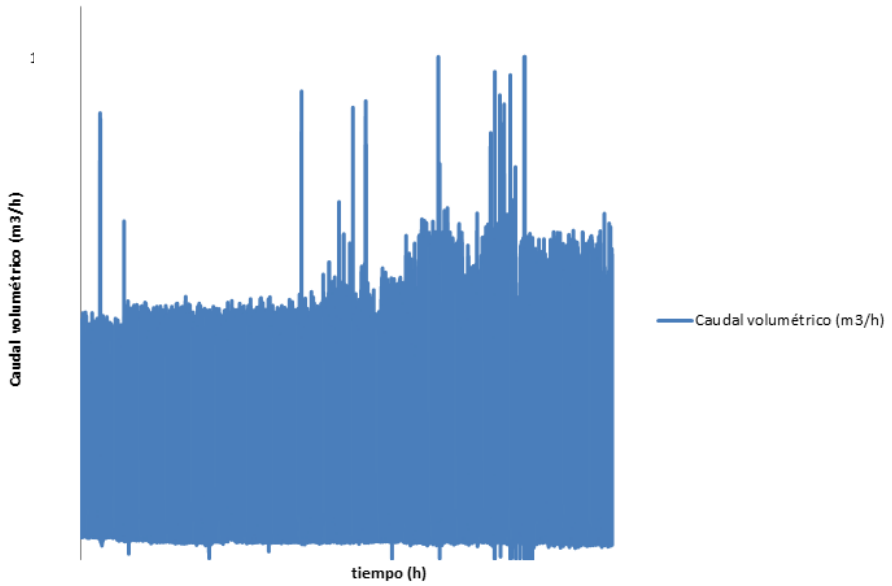


Figura 6.3 Caudal volumétrico de las emisiones del 5 de julio al 31 de diciembre del 2018.

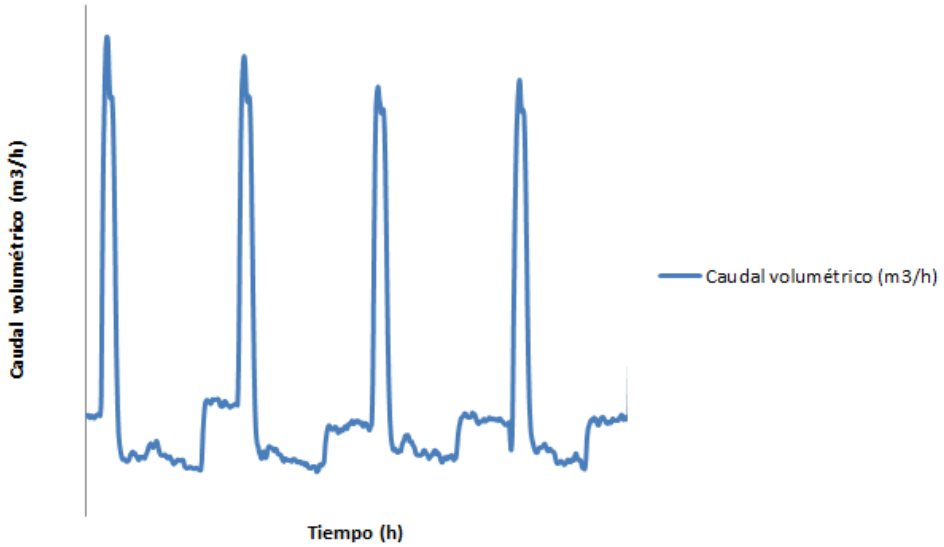


Figura 6.4 Caudal volumétrico de los venteos en función del tiempo.

Haciendo uso de los gráficos de Aspen Process Explorer, se han podido representar el caudal volumétrico de emisiones junto con los venteos de cada unidad y se ha obtenido lo siguiente:

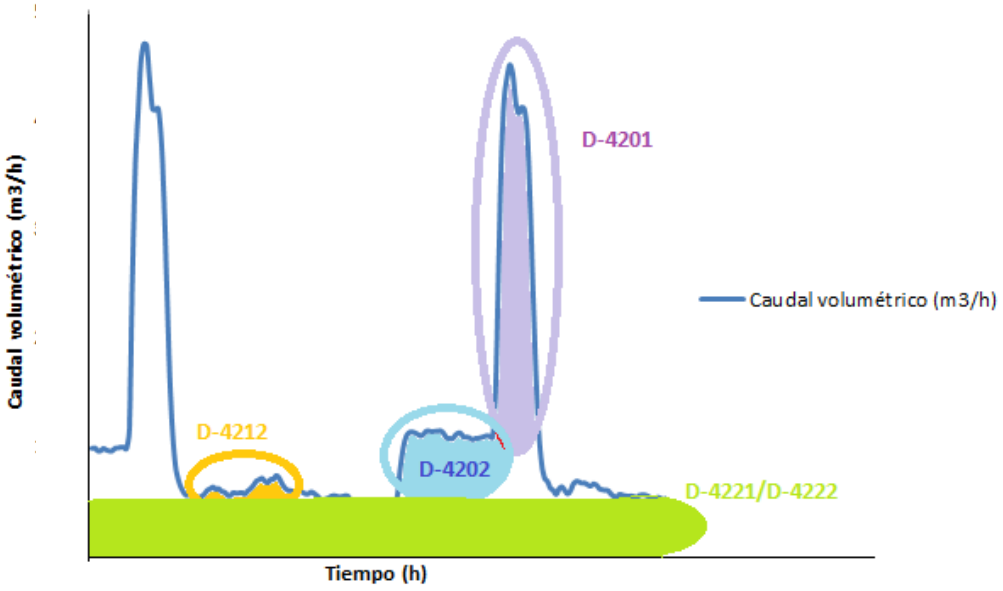


Figura 6.5 Caudal volumétrico en función del tiempo para los diferentes equipos.

Con la nueva instalación los valores de emisiones para el estireno se prevé que minimicen las emisiones de estireno en un 58% respecto las actuales.

6.2. Residuos líquidos

Actualmente se envía a tratamiento de agua aproximadamente 3.5 m^3/h para depurarla de las trazas de estireno y acrilonitrilo.

Con la nueva instalación no se generaría ningún nuevo residuo líquido debido a que todo el disolvente se utiliza como materia prima en el proceso de Polioles Poliméricos.

7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Con tal de conocer si esta inversión es rentable, se ha realizado un estudio de viabilidad económica. Se detallará la estimación de costes de la realización, construcción instalación y operación del nuevo sistema de venteos de la planta de Polioles Poliméricos

7.1. Estudio de la viabilidad de la nueva instalación

Los costes que ocasionan la construcción y ejecución del proyecto se dividen en dos tipos. Los costes fijos son los que se mantienen constante durante el funcionamiento de la instalación. En cambio, los costes variables dependen de si aumenta o disminuye la producción del proceso.

La estimación de los costes fijos se ha realizado usando el método de los porcentajes (Ref 11). En éste, primeramente se extraen los costes de los equipos (E) (Ref. 12) plasmados en la tabla 7.1. Los valores de los equipos son estimaciones del año 2016, por lo que se ha calculado el valor que tendrían actualmente mediante el IPC (1,8%).

Tabla 7.1 Estimación de costes de equipos.

Costes fijos de Equipos	**Precio 2016 €**	**Precio 2019€**
D-1001	293.000	31.956
E-1001	5.900	6.450
E-1002	41.500	45.372
G-1001A/B	7.120	7.784
Total	347.100	387.247

A partir de ahí, según el método mencionado, se considera el coste de los materiales (M) el 60% de los costes de equipos. Este apartado se desglosa en los diferentes subgrupos que se muestran en la tabla 7.2.

Taula 7.2 Estimación de costes de materiales.

Costes fijos de Materiales	**Precio €**	**Porcentaje**
Obra civil	65.057	$0.28 \cdot M$
Metalurgia	104.557	$0.45 \cdot M$
Instrumentación	23.235	$0.1 \cdot M$
Electricidad	23.235	$0.1 \cdot M$
Aislamiento y pintura	16.264	$0.07 \cdot M$

Costes fijos de Materiales	**Precio €**	**Porcentaje**
Total Materiales	232.348	M

Tabla 7.3 Costes fijos Inside Battery Limits (ISBL).

Costes fijos (ISBL)	**Precio €**	**Porcentaje**
Equipos	387.247	E
Materiales	232.348	M
Ingeniería de detalle	278.818	0.45·(E+M)
Construcción	309.797	0.5 · (E+M)
Supervisión construcción	61.959	0.1 · (E+M)
Total (ISBL)	1.270.169	ISBL

Tabla 7.4 Costes fijos totales.

Costes fijos	**Precio €**	**Porcentaje**
ISBL	1.270.169	ISBL
Servicios auxiliares	50.807	0.04 · ISBL
Interconexiones y OFF-SITES	101.613	0.08 · ISBL
Puesta en marcha	44.456	0.035 · ISBL
Imprevistos	127.017	0.1 · ISBL
Total	1.594.061	

A continuación, se han estimado los costes variables según la potencia requerida por la bomba y los metros cúbicos de vapor y agua de refrigeración calculados para los intercambiadores durante un año. Al igual que en la estimación de los costes de equipos, los precios de las *uttilities* correspondían al 2016, es por ello que se ha calculado el valor actual de cada una con un IPC del 1,8%.

Tabla 7.5 Estimación de costes variables.

Costes variables	**Precio €**
Vapor	5724
Energía eléctrica	1227
Agua refrigeración	12665
Total	19617

Finalmente se ha estimado el coste de inversión de un incinerador de llama directa para compararla con la alternativa que se ha propuesto en este proyecto. Siguiendo con los mismos pasos mencionados anteriormente para el estudio del *Scrubber*, se ha obtenido un valor de 900000 €. Pese que el valor de inversión inicial del incinerador sea inferior al del proyecto estudiado, los costes de operación de un incinerador son muy superiores debido al aporte de gas natural que necesita continuamente para quemar los venteos. Se ha calculado una aproximación de costes variables para la alternativa del incinerador que ascienden a 448000 €/año.

7.2. Cuenta de resultados de la nueva instalación

El presente proyecto se trata de una inversión defensiva que debe hacerse con el fin de no parar la producción de poliol polimérico. La implantación de este proyecto tendría un tiempo de retorno de dos meses.

Para realizar el balance económico de la instalación se ha estudiado el ahorro por alternativa más económica en vez de los beneficios de la planta en sí. Donde el ahorro es la diferencia entre los costes variables del incinerador y los costes variables del proyecto presentado.

Establecidos los ahorros, gastos e inversión, se hace una cuenta de resultados plasmada en las tablas 7.6-7.8 de los 15 años que se ha estimado de vida a la instalación. Donde, la tasa impositiva (Ref. 13) se ha determinado del 21%, el BAII hace referencia a los beneficios antes de impuestos e intereses y el BAIDI corresponde a los beneficios antes de intereses y después de impuestos. En los costes variables se ha tenido en cuenta la inflación aplicándose un IPC de 1.8% para cada año transcurrido.

Tabla 7.6 Cuenta de resultados de la instalación.

Cuenta de resultado	**Año 1**	**Año 2**	**Año 3**	**Año4**	**Año 5**
Ahorro costes variables	428.748	436.466	444.322	452.320	460.462
Diferencia de inversión	693.971	0	0	0	0
Amortización	106.271	106.271	106.271	106.271	106.271
BAII	-371.493	330.195	338.051	346.049	354.191
Impuestos (21%)	0	-69.341	-70.991	-72.670	-74.380
BAIDI	-371.493	260.854	267.061	273.379	279.811
Amortización	106.271	106.271	106.271	106.271	106.271
Free Cash Flow	-265.222	367.125	373.331	379.650	386.082

Tabla 7.7. Continuación cuenta de resultados de la instalación.

Cuenta de resultado	**Año 6**	**Año 7**	**Año 8**	**Año 9**	**Año 10**
Ahorro costes variables	468.750	477.188	485.777	494.521	503.422
Diferencia de inversión	0	0	0	0	0
Amortización	106.271	106.271	106.271	106.271	106.271
BAII	362.479	370.917	379.506	388.250	397.151
Impuestos (21%)	-76.121	-77.893	-79.696	-81.533	-83.402
BAIDI	286.359	293.024	299.810	306.718	313.750
Amortización	106.271	106.271	106.271	106.271	106.271
Free Cash Flow	392.629	399.295	406.081	412.988	420.020

Tabla 7.8 Continuación cuenta de resultados de la instalación.

Cuenta de resultado	**Año 11**	**Año 12**	**Año 13**	**Año 14**	**Año 15**
A Ahorro costes variables	512.484	521.709	531.099	540.659	550.391
Diferencia de inversión	0	0	0	0	0
Amortización	106.271	106.271	106.271	106.271	106.271
BAII	406.213	415.348	424.829	434.388	444.120
Impuestos 21%	-85.305	-87.242	-89.214	-91.222	-93.265
BAIDI	320.908	328.196	335.615	343.167	350.855
Amortización	106.271	106.271	106.271	106.271	106.271
Free Cash Flow	427.179	434.467	441.885	449.438	457.126

7.3. Evaluación global del proyecto

La evaluación global del proyecto se ha realizado mediante el método financiero del Valor Actual Neto (VAN). Este es un criterio que consiste en actualizar los cobros y pagos de una inversión para conocer cuánto se va a ganar (VAN>0) o perder (VAN <0) con la modificación.

Por otro lado, la tasa interna de retorno (TIR) es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. El valor del tipo de descuento o interés (K) establecido por Repsol para el cálculo de la rentabilidad de proyectos es del 10%.

El VAN obtenido ha sido de 756.754 €. Igualando el VAN a cero se ha determinado la tasa interna de retorno con un valor del 17%. Estos valores corroboran la elección del *Scrubber* enfrente del incinerador de llama directa.

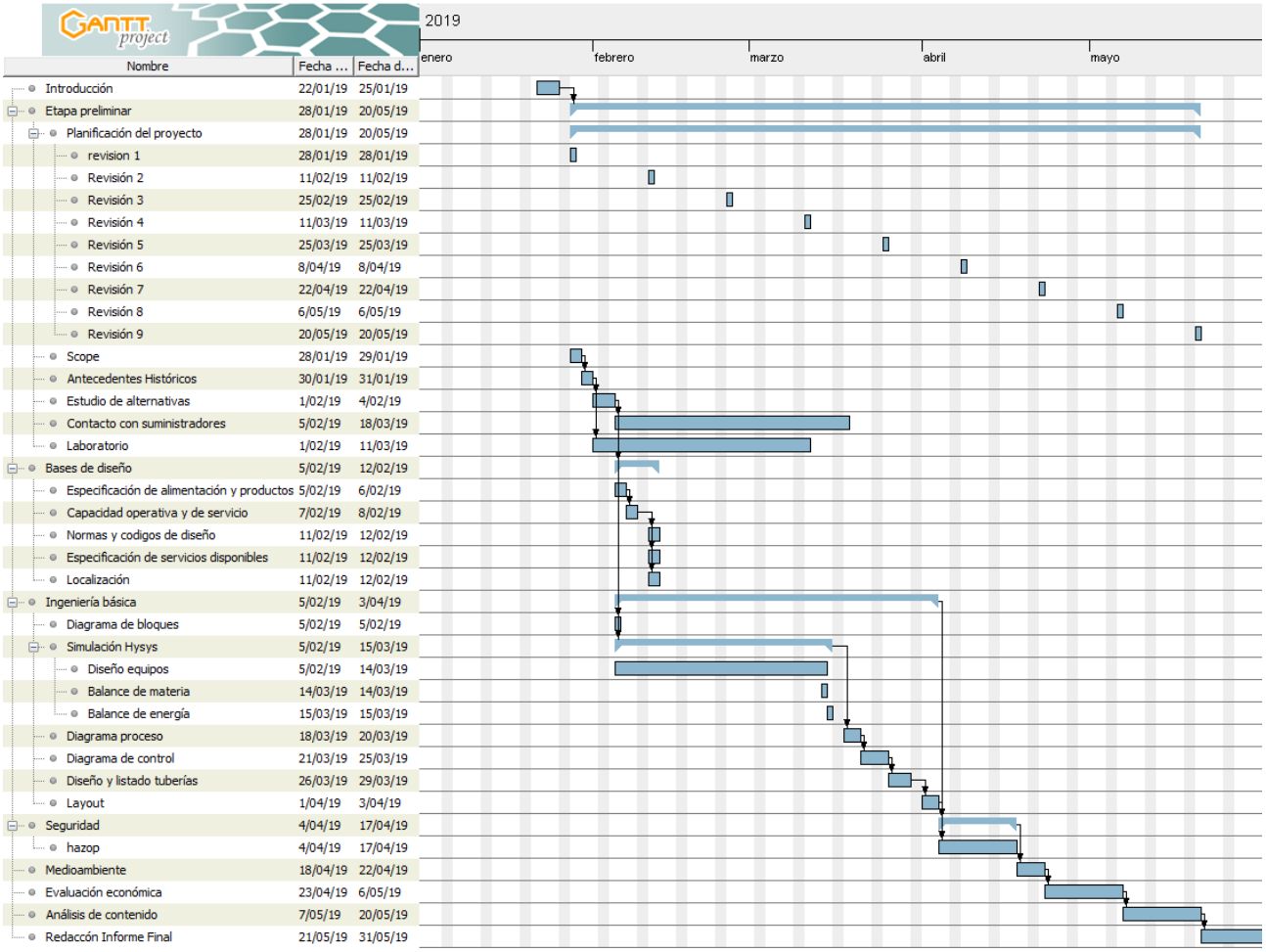
8. BIBLIOGRAFÍA

1. BD Polioles Flexibles- Poliméricos. Documentación Dirección de ingeniería Repsol.
2. ICSC. Fichas Internacionales de Seguridad Química. [Consulta 07/01/2019]. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/0a100/nspn0073.pdf
3. ICSC. Fichas Internacionales de Seguridad Química. [Consulta 07/01/2019] http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/0a100/nspn0092.pdf
4. ICSC. Fichas Internacionales de Seguridad Química. [Consulta 07/01/2019] http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/101a200/nspn0192.pdf
5. Guía de selección de especificación de material de tuberías. Documentación Dirección de ingeniería Repsol.
6. Grupo Vemacero C.A. Tuberías de acero al carbono. [Consulta 15/03/2019]. https://www.vemacero.com/Tablas/A53MP.pdf
7. Frank White. Mecánica de fluidos. Ed.6 [Página 360]
8. SlideShare. Guía de intercambiadores de calor, tipos generales y aplicaciones. [Consulta 20/05/2019] https://es.slideshare.net/yumardiaz/intercambiadores-decalortiposgeneralesyaplicaciones
9. Bombas de desplazamiento positivo. [Página 16]. Documentación Dirección de ingeniería Repsol.
10. Bombas Hasa. Catálogo General 2018. [Consultado 20/04/2019]. www.bombashasa.com/imag/cat-tarifa/catalogo.pdf
11. Estimación de inversión por método de porcentajes. Documentación Dirección de ingeniería Repsol
12. Matches. Índice de equipos de proceso. [Consulta 05/05/2019]. http://www.matche.com/equipcost/EquipmentIndex.html
13. Bankinter. Análisis Sector Petróleo. Repsol. [Consulta 23/04/2019]. https://broker.bankinter.com/www/es-es/cgi/broker+binarios?secc=PVAL&subs=IBEX&nombre=Repsol_23_02_2017.pdf
14. Clark-Koch. Eliminación de Nieblas. [Consultado 01/06/2019]. http://www.impolama.com/pdf_products/eliminadores_de_nieblas_espanol.pdf
15. Internos de columna. [Consultado 01/06/2019]. https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/314741/RVT_Internos_de_Columna_es.pdf

A. ANEXO

A.1. Diagrama de Gantt

A continuación se muestra la primera versión del diagrama de Gantt.



Nombre	Fecha ...	Fecha d...
Introducción	22/01/19	25/01/19
Etapa preliminar	28/01/19	20/05/19
Planificación del proyecto	28/01/19	20/05/19
revision 1	28/01/19	28/01/19
Revisión 2	11/02/19	11/02/19
Revisión 3	25/02/19	25/02/19
Revisión 4	11/03/19	11/03/19
Revisión 5	25/03/19	25/03/19
Revisión 6	8/04/19	8/04/19
Revisión 7	22/04/19	22/04/19
Revisión 8	6/05/19	6/05/19
Revisión 9	20/05/19	20/05/19
Scope	28/01/19	29/01/19
Antecedentes Históricos	30/01/19	31/01/19
Estudio de alternativas	1/02/19	4/02/19
Contacto con suministradores	5/02/19	18/03/19
Laboratorio	1/02/19	11/03/19
Bases de diseño	5/02/19	12/02/19
Especificación de alimentación y productos	5/02/19	6/02/19
Capacidad operativa y de servicio	7/02/19	8/02/19
Normas y codigos de diseño	11/02/19	12/02/19
Especificación de servicios disponibles	11/02/19	12/02/19
Localización	11/02/19	12/02/19
Ingeniería básica	5/02/19	3/04/19
Diagrama de bloques	5/02/19	5/02/19
Simulación Hysys	5/02/19	15/03/19
Diseño equipos	5/02/19	14/03/19
Balance de materia	14/03/19	14/03/19
Balance de energía	15/03/19	15/03/19
Diagrama proceso	18/03/19	20/03/19
Diagrama de control	21/03/19	25/03/19
Diseño y listado tuberías	26/03/19	29/03/19
Layout	1/04/19	3/04/19
Seguridad	4/04/19	17/04/19
hazop	4/04/19	17/04/19
Medioambiente	18/04/19	22/04/19
Evaluación económica	23/04/19	6/05/19
Análisis de contenido	7/05/19	20/05/19
Redaccón Informe Final	21/05/19	31/05/19

A.2. Suministradores

A.2.1. Sulzer

SULTECH 8.5

Reference: 9062978 REQUISCRUB
Customer: REPSOL QUIMICA TARRAGONA
Service: SCRUBBER
Item:
Date Run: 2-Apr-2019

PRELIMINARY DESIGN -- INTERNAL USE ONLY -- WILL BE OPTIMIZED IN CASE OF ORDER

SECTION SUMMARY SCRUBBER

Section	Height [m]	Diameter [mm]	Material	Product [mbar]	Pressure drop
1	-	800	316 L	M252.Y	3.65

Top pressure

Total Pressure Drop 3.65 [mbar]

Total Pressure Drop incl. Internals 3.65 [mbar]

SULZER CONFIDENTIAL

SULTECH 8.5

Reference: 9062978 REQUISCRUB
Customer: REPSOL QUIMICA TARRAGONA
Service: SCRUBBER
Item:
Date Run: 2-Apr-2019

PRELIMINARY DESIGN -- INTERNAL USE ONLY -- WILL BE OPTIMIZED IN CASE OF ORDER

PACKING DESIGN Section 1

Section 1

Max Gas Flow Rate

Geometry Data

Geometry: Packing2

Packing Type: M252.Y

Material: 316 L

Column Diameter [mm]: 800

Packing height [m]: -

Sheet Thickness [mm]: 1.00

Dry Weight [kg]: 976.95

Fluid Data

Gas:	Design Top	Design Btm	Max Top	Max Btm	Min Top	Min Btm
Flow Multiplier [%]:	100	100	120	120	80	80
Mult. Vapor Rate [kg/h]:	1000.0	1000.0	1200.0	1200.0	800.0	800.0
Density [kg/m³]:	2.340	2.304	2.340	2.304	2.340	2.304
Viscosity [cP]:	1.8100	1.8100	1.8100	1.8100	1.8100	1.8100
QV [m³/s]: Liquid:	0.12	0.12	0.14	0.14	0.09	0.10
Flow Multiplier [%]:	100	100	120	120	80	80
Mult. Liquid Rate [kg/h]:	800.0	800.0	960.0	960.0	640.0	640.0
Density [kg/m³]:	841.50	841.50	841.50	841.50	841.50	841.50
Surface Tension [mN/m]:	19.82	19.82	19.82	19.82	19.82	19.82
Viscosity [cP]:	652.300	652.300	652.300	652.300	652.300	652.300
QL [m³/h]:	0.95	0.95	1.14	1.14	0.76	0.76
Foaming Factor:	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Hydraulic Data

Capacity [%]:	14.7	14.8	17.7	17.8	11.8	11.9
F-Factor [Pa^0.5]:	0.36	0.36	0.43	0.44	0.29	0.29
Spec. liquid load [m³/m²h]:	1.89	1.89	2.27	2.27	1.51	1.51
Pressure drop [mbar/m]:	1.68	1.70	2.06	2.09	1.31	1.33
Flow Parameter:	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042
Liquid Holdup [%]:	11.7		12.5		10.9	
Bed pressure drop [mbar]:	3.65		4.49		2.85	

Design Notes: packing sheet thickness increased to; 1mm due to high viscosity

Engineer Name: File: P:\MTT-CTCH\9062xxx....M252Y_s=1mm_TK.SULT

Copyright © 2019. This information is the exclusive property of Sulzer and it can not be distributed to any party without written consent from Sulzer. The figures indicated herein are for information purposes only and not binding to the supplier. Any assured quality performance guarantee or specification may only be accepted, if expressly identified as such.

A.2.2. Spraying Sysems Co.

BOQUILLAS *WhirlJet*® ASPERSIÓN ESTÁNDAR

D

CARACTERÍSTICAS Y BENEFICIOS

- Patrón de aspersión de cono hueco con área de impacto en forma de anillo.
- Amplio paso de flujo sin obstrucciones para minimizar los taponamientos.
- Distribución uniforme en una amplia gama de capacidades y presiones.
- Gotas de pequeñas a medianas.
- Buena atomización de los líquidos a bajas presiones, rápida transferencia de calor, choque efectivo de gotas en suspensión en el aire.
- Tapas removibles en muchos modelos para una fácil inspección y limpieza.
- Fondo de pendiente en varios modelos para reducir el efecto de taladro del fluido en la recámara de turbulencia.
- Modelos de fundición de una pieza cuentan con un acabado de precisión y el diseño original de recámara de turbulencia.
- Modelos de fundición de dos piezas producen una atomización más fina comparada con la de otras boquillas del mismo gasto y trabajando a la misma presión.
- Los modelos en polipropileno ofrecen una excelente resistencia a la corrosión a temperaturas de hasta 160°F (71°C); el diseño patentado de poste central (Patente No. 4,664,314) proporciona un mayor control del vórtice del líquido y una mayor vida útil.

D BOQUILLAS DE CONO HUECO

CONSEJOS DE OPTIMIZACIÓN

- Ver página D2 para consejos de optimización.

APLICACIONES

- Aspersión de salmuera
- Procesos químicos
- Control de polvos
- Enfriamiento por evaporación en lagunas de aireación y torres de enfriamiento
- Lavado y enfriamiento de gases
- Tratamiento de metales
- Desengrasado de productos
- Aireación de agua
- Enfriamiento de agua

VER TAMBIÉN

- Accesorios
  - Conectores de bola ajustables
  - Manómetros
  - Reguladores de presión
  - Válvulas solenoides
  - Conectores split-eyelet
  - Filtros
  - Conectores giratorios
- Boquillas SprayDry® de Gran Capacidad

D

BOQUILLAS *WhirlJet*™ ASPERSIÓN ESTÁNDAR

BOQUILLAS DE CONO HUECO

A

Diseño original WhirlJet tipo recámara de turbulencia
Tapa desmontable
1/8" a 3/4" NPT o BSPT (H)

AX

Diseño con fondo en pendiente
Tapa desmontable
1/8" a 3/4" NPT o BSPT (H)

B

Diseño original WhirlJet tipo recámara de turbulencia
Tapa desmontable
1/8" a 3/4" NPT o BSPT (M)

BX

Diseño con fondo en pendiente
Tapa desmontable
1/8" a 3/4" NPT o BSPT (M)

C

Tipo fundición de una pieza
1/2" a 3/4" NPT o BSPT (H)

CX

Diseño con fondo en pendiente
Tipo fundición de una pieza
1" a 2-1/2" NPT o BSPT (H)

CF

Tipo fundición de dos piezas
conexión bridada de 4" a 6"

CRC

Tipo fundición de dos piezas
1-1/4" a 4" NPT o BSPT (H)

D

Tipo fundición de una pieza
1/2" a 3/4" NPT o BSPT (M)

AP

1/4" a 3/8" NPT o BSPT (H)

LAP

3/8" a 1/2" NPT o BSPT (H)

LBP

3/8" NPT o BSPT (M)

INFORMACIÓN PARA HACER PEDIDO

BOQUILLA DE ASPERSIÓN ESTÁNDAR				
1/4	A	–	SS	10
Conexión Entrada	Tipo de Boquilla		Código de Material	Tamaño

BOQUILLA DE ASPERSIÓN ESTÁNDAR					
9360	–	3/8	AP	– PP	3
Serie No.		Conexión Entrada	Tipo de Boquilla	Código de Material	Tamaño

CONEXIÓN BRIDADA				
6	CF	–	SS	550-65
Conexión Entrada	Tipo de Boquilla		Código de Material	Tamaño

Para conexiones BSPT se requiere agregar una "B" antes de la conexión de entrada.

A.3. Características técnicas de las bombas G-1001A/B.

BOMBAS hasa

Serie F
Electrobombas de engranajes monobloc

APLICACIONES / APPLICATIONS / APPLICATIONS

ES Electrobombas robustas autoaspirantes monobloc de engranajes, volumétricas de desplazamiento positivo. Útiles para el trasvase de fluidos viscosos, en particular: gas-oil, fuel-oil, aceites, jarabes, glicerina, pintura, etc., y en general, todo tipo de líquidos lubricantes sin partículas en suspensión

EN Robust self-priming close-coupled gear pumps, volumetric of positive displacement. Useful for the transfer of viscous fluids, particularly: gas-oil, fuel-oil, oils, syrups, glycerine, paint, etc. and in general, all kind of lubricant liquids without suspended particles.

FR Électropompes robustes auto-amorçantes monobloc à engrenages, volumétriques à déplacement positif. Idéales pour le transvasement de fluides visqueux, en particulier: gasoil, fuel, huiles, sirops, glycérine, peinture, etc., et en général, tout type de liquides lubrifiants sans particules en suspension.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS / TECHNICAL CHARACTERISTICS / CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Tipo *Type*	**Motor** *Moteur*	**Aislamiento** *Isolation*	**r.p.m.**	**Refrigeración** *Cooling* *Refroidissement*	**Presión max.** *Max. pressure* *Pression max.*	**Temp. max.**	**Viscosidad max.** *Max. viscosity* *Viscosité max.*
Engranajes *Gear pumps* *Engrenages*	**Trifásico** *Three-phase* *Triphasé*	F	1450	**Ventilación externa** *External ventilation* *Ventilation externe*	12 BAR	150ºC	350 cSt (SAE 120)

Pueden instalarse en cualquier posición, tanto horizontal como vertical, para adaptarse mejor al espacio disponible. */ It can be installed in any position, vertical or horizontal, in order to better fit to the available space. / Peuvent être installées en toutes les positions, horizontale ou verticale, pour mieux s'adapter à l'espace disponible.*

Válvula de seguridad incorporada en la tapa de la bomba. */ Built-in safety valve in the pump cover. / Vanne de sécurité incorporée dans couvercle de la pompe.*

Bajo demanda disponible con motor de 6 u 8 polos e incluso con motor reductor para viscosidades superiores. */ Upon request, available with 6 or 8-poles motors or even with geared motor for higher viscosity. / Sur commande, disponible avec moteur à 6 ou 8 pôles et même avec moteur réducteur pour viscosités supérieures.*

También disponible con motor ATEX. */ Also available with ATEX motor. / Aussi disponible avec moteur ATEX.*

Posibilidad de montar con empaquetadura para trabajar líquidos de hasta 250 ºC. */ Possibility of installation with packing to work with liquids up to 250 ºC / Possibilité de monter avec garniture d'étanchéité pour fonctionner avec des liquides jusqu'à 250 ºC.*

MATERIALES / MATERIALS / MATÉRIAUX

Cuerpo bomba - *Pump body - Corps de pompe*	**Fundición de hierro** - *Cast iron - Fonte*
Engranajes - *Gears - Engrenages*	**Acero de cementación** - *Case-hardening steel - Acier de cémentation*
Eje - *Shaft - Arbre*	**Acero de cementación** - *Case-hardening steel - Acier de cémentation*
Cierre mecánico - *Mechanical seal - Fermeture mecánique*	**Viton**
Junta - *O'ring - Joint*	**Viton**

CURVA / CURVE / COURBE

Modelo *Model* *Modèle*	**Cod.**	**P2**		**Ø**		**Presión max.** *Max. pressure* *Pression max.* (kg/cm²)	**Caudal** *Flow* *Débit* (l/h)	**Aspiración max.** *Max. suction depth* *Aspiration max.* (m)
		kW	CV	Asp	Imp			
F-00/10	1960	0,18	**0,25**	1/4"	1/4"	7	100	4
F-00/11	1961	0,18	**0,25**	1/4"	1/4"	7	170	4
F-00/12	1962	0,18	**0,25**	3/8"	3/8"	7	320	4
F-00/16	1963	0,25	**0,33**	3/8"	3/8"	7	440	4
F-0	1964	0,37	**0,5**	3/4"	3/4"	7	720	4
F-1	1965	0,75	**1**	1"	1"	7	1140	6
F-1-E		1,1	**1,5**	1"	1"	7	1700	6
F-2	1966	1,5	**2**	1"	1"	7	3050	6
F-3	1967	2,2	**3**	1 ¼"	1 ¼"	6	5400	6
F-4	1968	3,0	**4**	1 ½"	1 ½"	6	8100	6
F-5	1969	5,5	**7,5**	2"	2"	4	13200	8
F-6	1970	7,5	**10**	2 ½"	2 ½"	4	21700	8

A.4. Balance de energía de la instalación

A continuación se ha plasmado en la tabla A.1. el balance de energía de la instalación.

Tabla A.1. Balance de energía de la instalación

Corriente	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**18**
Cp (KJ/kg)	1,040	1,558	1,691	1,648	1,650	1,650	1,650	1,558	1,053	1,040
m (kg/h)	383	1000	1000	7000	7000	1000	6000	6000	484	99
Q (KW)	3,319	12,984	-4,696	2,243	0,000	-0,321	-56,933	0,000	-4,246	0,858