

**Ivan Rubio Rodríguez**

**Aumento de la capacidad de condensación de propileno**

**Trabajo Fin de Máster  
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

**Máster en Ingeniería Industrial**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona**

**2021**



# Índice

1	Introducción .....	1
2	Etapa Preliminar .....	1
2.1	Descripción del proyecto .....	1
2.2	Alcance del proyecto .....	1
2.3	Descripción del proceso .....	2
2.4	Otras opciones de diseño .....	2
3	Bases de diseño .....	2
3.1	Especificación de corrientes.....	2
3.2	Especificación de los corrientes de salida .....	2
3.3	Objetivo principal .....	3
3.4	Códigos y estándares de diseño.....	3
3.5	Localización .....	3
3.5.1	Datos meteorológicos.....	3
4	Ingeniería básica .....	4
4.1	Diagramas de proceso .....	4
4.1.1	Diagrama de Bloques .....	5
4.1.2	PFD.....	6
4.1.3	P&ID .....	7
4.2	Diseños.....	8
4.2.1	Diseño de tuberías .....	8
4.2.2	Diseño del intercambiador (E-1-N).....	11
4.2.3	Diseño de la suportación adicional necesaria para el equipo .....	24
5	Seguridad .....	31
5.1	Proceso de estudio .....	31
5.2	Alcance .....	31
5.3	Propósito del análisis .....	31
5.4	Modelo de estudio .....	32
5.5	Método HAZOP aplicado en la unidad de estudio .....	32
6	Mantenimiento .....	39
7	Conclusiones.....	40
8	Bibliografía.....	41
A	Propiedades de los fluidos .....	44
A.1	Propiedades del propileno .....	44
A.2	Propiedades del agua de refrigeración.....	49

B	Método de cálculo .....	52
B.1	Diseño de las tuberías .....	52
B.1.1	Cálculo del aislamiento térmico de las tuberías .....	54
B.2	Diseño del intercambiador.....	56
B.2.1	Cálculo de los coeficientes de transferencia y método LMTD.....	56
B.2.2	Cálculo de la pérdida de carga .....	59
B.3	Diseño de la suportación adicional del equipo .....	59
B.3.1	Simulación de las patas .....	60
B.3.2	Simulación de las vigas.....	61
C	Seguridad .....	61
C.1	Estudio cualitativo .....	61
C.2	Estudio cuantitativo.....	62

## 1 Introducción

Título del proyecto	Aumento de la capacidad de condensación de propileno
Coordinador	Guasch Pesquer, Lluís
Tutor universidad	Vallès Rasquera, Joan Manel
Tutor empresa	Ferreté Teixidó, Antón
Autor	Rubio Rodríguez, Ivan

A consecuencia de los cambios en la demanda de propileno en la planta de cracker de la empresa DOW Chemical Ibérica, se quiere incrementar la capacidad de condensación de propileno.

El propileno es una materia que usan tanto para aportar frío a toda la planta mediante un circuito cerrado, como producto de proceso para vender. Según los requerimientos existentes en cada momento, se desvía cierto caudal a una parte de proceso o a otra para dichos fines.

El punto donde se quiere implementar este aumento de condensación se localiza posterior a la tercera etapa de compresión del propileno. A partir de aquí, el propileno es enviado a diferentes zonas de descompresión para generar calidad de frío.

Es por eso por lo que se pide el diseño de un intercambiador que pueda condensar cierto caudal de propileno proveniente de las etapas de compresión.

La función de la unidad a diseñar será el aprovechamiento del frío que puede aportar el corriente de agua de refrigeración para condensar el propileno.

El proyecto consiste principalmente en la realización de un modelo matemático que defina el diseño del intercambiador y represente las condiciones del proceso aportadas por la empresa. Además, se deberá diseñar el soporte adicional del equipo.

## 2 Etapa Preliminar

### 2.1 Descripción del proyecto

Para obtener una fuente de frío de calidad en la planta, se hace uso del propileno producido en el cracker, y este pasa por una serie de etapas de compresión y refrigeración para, posteriormente, expandirlo y obtener corrientes de propileno a bajas temperaturas.

En el ejercicio de aumento de capacidad de condensación, se requiere la introducción de un nuevo intercambiador que supla el aumento de caudal de propileno comprimido. Para ello, se ha facilitado el caudal deseado a condensar por el intercambiador, que es de 64 ton/h de propileno. Es por eso que se debe realizar el diseño de un nuevo intercambiador, el cual siga un modelo matemático lo más próximo posible a la realidad.

Cabe destacar que actualmente no existe suportación donde incorporarlo, por lo que se deberá calcular el soporte necesario para sostener el equipo en planta.

### 2.2 Alcance del proyecto

En la parada que va a tener lugar próximamente, se tiene previsto realizar unos picajes en los colectores de propileno y de agua de refrigeración, y dejar unas esperas con tapas. De esta forma, posteriormente, al realizar el diseño y la construcción de dicho intercambiador, se podrá montar sin ser necesario ninguna bajada de carga ni parada.

El proyecto alcanza desde las esperas donde se van a localizar las líneas de entrada hasta las esperas donde se van a localizar las líneas de salida del intercambiador, diseñando así el equipo como las líneas que conectan dicho equipo a los colectores, además de diseñar la suportación adicional que se requiere en planta.

## 2.3 Descripción del proceso

Una vez producido el propileno en la planta del cracker, se distribuye a tres vías diferentes.

Por un lado, el propileno es tratado como producto final de la reacción de craqueo. Por otro lado, se introduce dentro de un sistema cerrado donde se usa como refrigerante para la planta. Y, por último, puede ser derivado al colector de producción cuando es necesario reponer el nivel para compensar pequeñas pérdidas del circuito.

Los requisitos que dictan si es para un uso u otro se basan en la demanda de este. Por ejemplo, en verano, a raíz del aumento de las temperaturas se precisa un caudal mayor de refrigeración, por lo que se da prioridad a la vía del refrigerante.

Para que el propileno se pueda usar como refrigerante, pasa por 3 etapas de compresión y refrigeración. Estas acaban con el propileno condensado y enviado a otras 3 etapas diferentes de descompresión donde se "produce" la calidad de frío deseada (+5°C, -20°C, -40°C). Desde estas últimas etapas se destina directamente a las zonas que requieran de dicho servicio.

## 2.4 Otras opciones de diseño

Una vez realizado el modelo de cálculo del intercambiador, si se observa que el modelo de los equipos actual no puede llevar a cabo la condensación de forma adecuada, se deberá realizar un redimensionamiento del equipo para que cumpla correctamente con las especificaciones del producto. Esto abarcaría un posible estudio de aumento del área efectiva de intercambio añadiendo tubos y/o aumentando la capacidad en carcasa.

# 3 Bases de diseño

## 3.1 Especificación de corrientes

Las condiciones de carga se definen en base a los datos deseados que han sido proporcionados por la empresa. Las condiciones de los corrientes quedan especificadas en la tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1 Condiciones de los corrientes de entrada al intercambiador.

Corriente	Caudal másico (ton/h)	T (°C)	P (kgf/cm <sup>2</sup> )	Fracción de vapor
Agua de refrigeración	1650	27	6,033	0
Propileno	64,00	63,3	14,333	1

## 3.2 Especificación de los corrientes de salida

La especificación de los corrientes de salida viene determinada por la caída de presión producida en el equipo, y la temperatura en la alimentación de la unidad. Para definir unas bases de diseño, se definen las siguientes especificaciones:

- La caída de presión en lado carcasa no puede ser superior a 0,19 kgf/cm<sup>2</sup>.
- La temperatura de salida de propileno, en lado carcasa, debe estar por debajo de

- 36,26 °C para que se produzca la condensación de este corriente.
- La caída de presión en lado tubos no puede ser mayor a 0,62 kgf/cm<sup>2</sup>.

### 3.3 Objetivo principal

El intercambiador debe ser capaz de realizar la condensación del propileno de forma continua cumpliendo las especificaciones presentadas.

Además, se observará variaciones en las condiciones de entrada del propileno y, también, el caudal máximo de propileno que se puede introducir en el equipo manteniendo la condensación total del corriente.

### 3.4 Códigos y estándares de diseño

Para el caso del diseño de tuberías se sigue las pautas de ANSI y ASME B31.1.

### 3.5 Localización

La planta de Cracker y Octeno de la empresa DOW Chemical Ibérica se encuentra en el polígono norte de Tarragona, La Poble de Mafumet, con código postal 43140. En la figura 3.5.1 se puede observar la localización exacta de la zona.

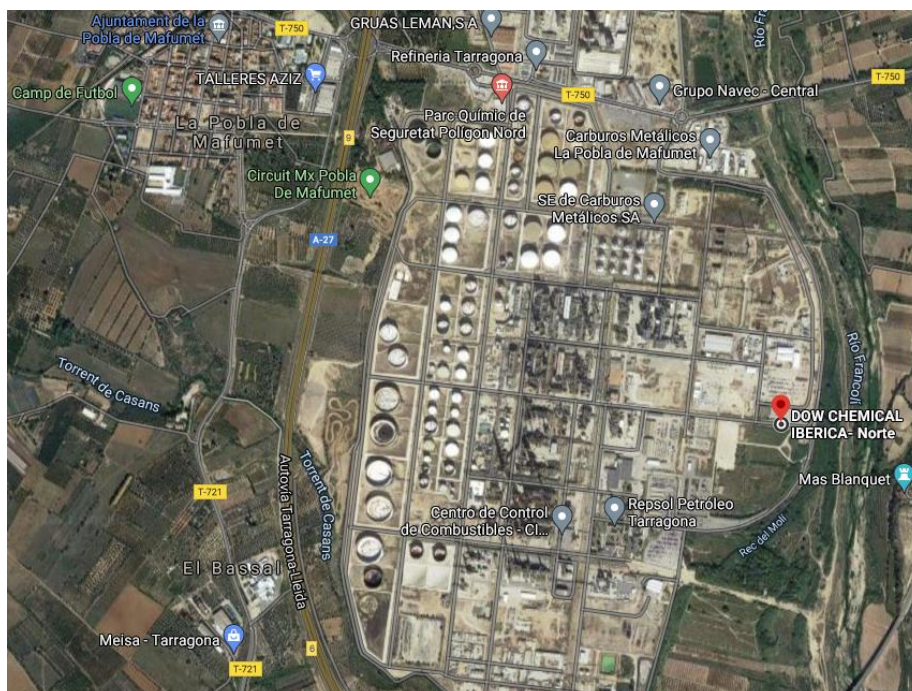


Figura 3.5.1. Localización de la planta de DOW Chemical Ibérica (Cracker y Octeno).

#### 3.5.1 Datos meteorológicos

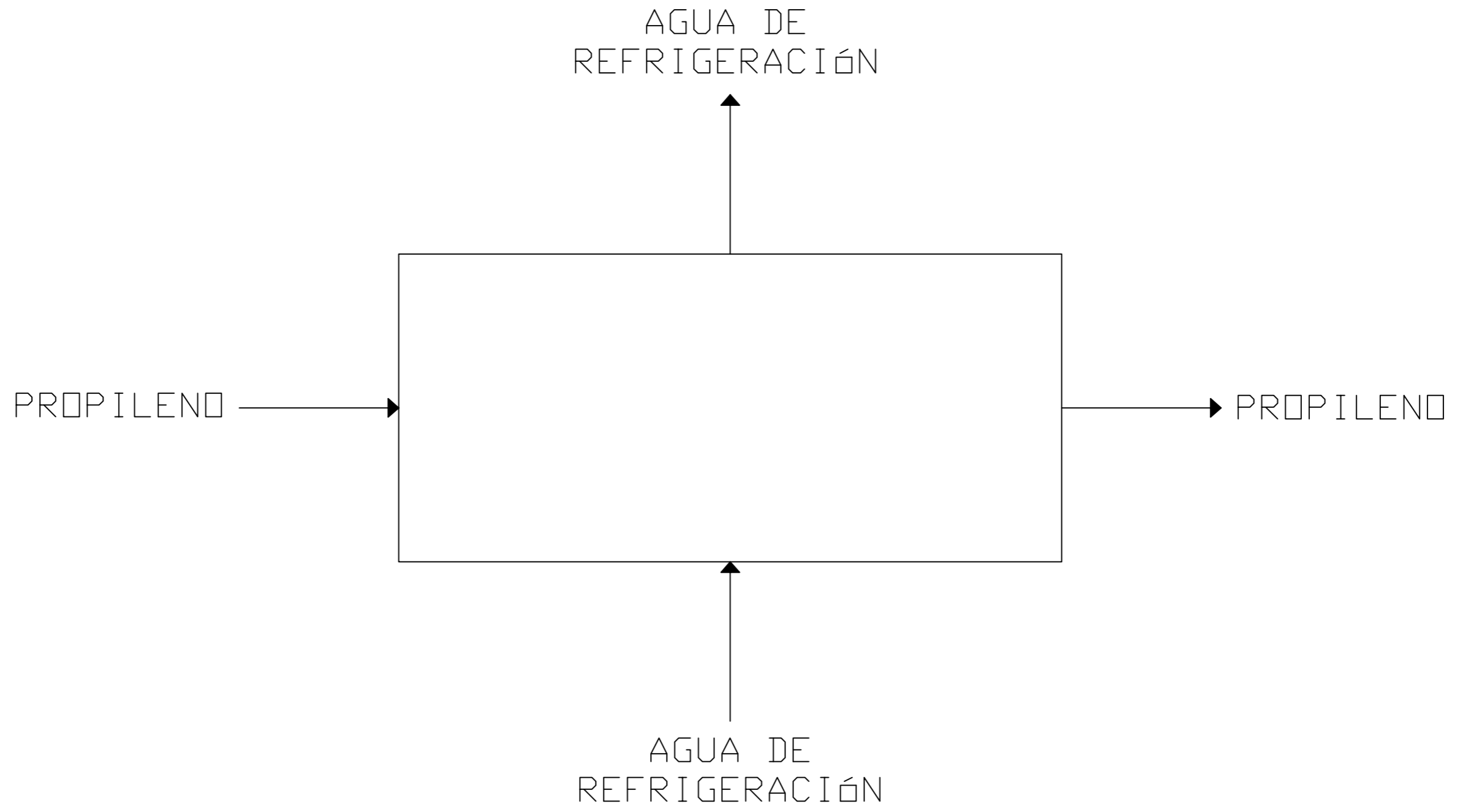
Los datos climatológicos serán cruciales para algunos cálculos. Estos son los de la población más cercana, La Poble de Mafumet. En la tabla 3.5.1 se pueden observar dichos datos [1].

Tabla 3.5.1 Datos meteorológicos de La Pobra de Mafumet.

Datos Meteorológicos	Valores
Altitud (m)	112
Temperatura media anual (°C)	16,3
Temperatura máxima media anual (°C)	22,0
Temperatura mínima media anual (°C)	10,8
Temperatura máxima absoluta (°C)	34,2
Temperatura mínima absoluta (°C)	-2,70
Precipitaciones anuales (mm)	507,9
Humedad relativa (%)	74,0
Velocidad media del aire (m/s)	2,40


## **4 Ingeniería básica**

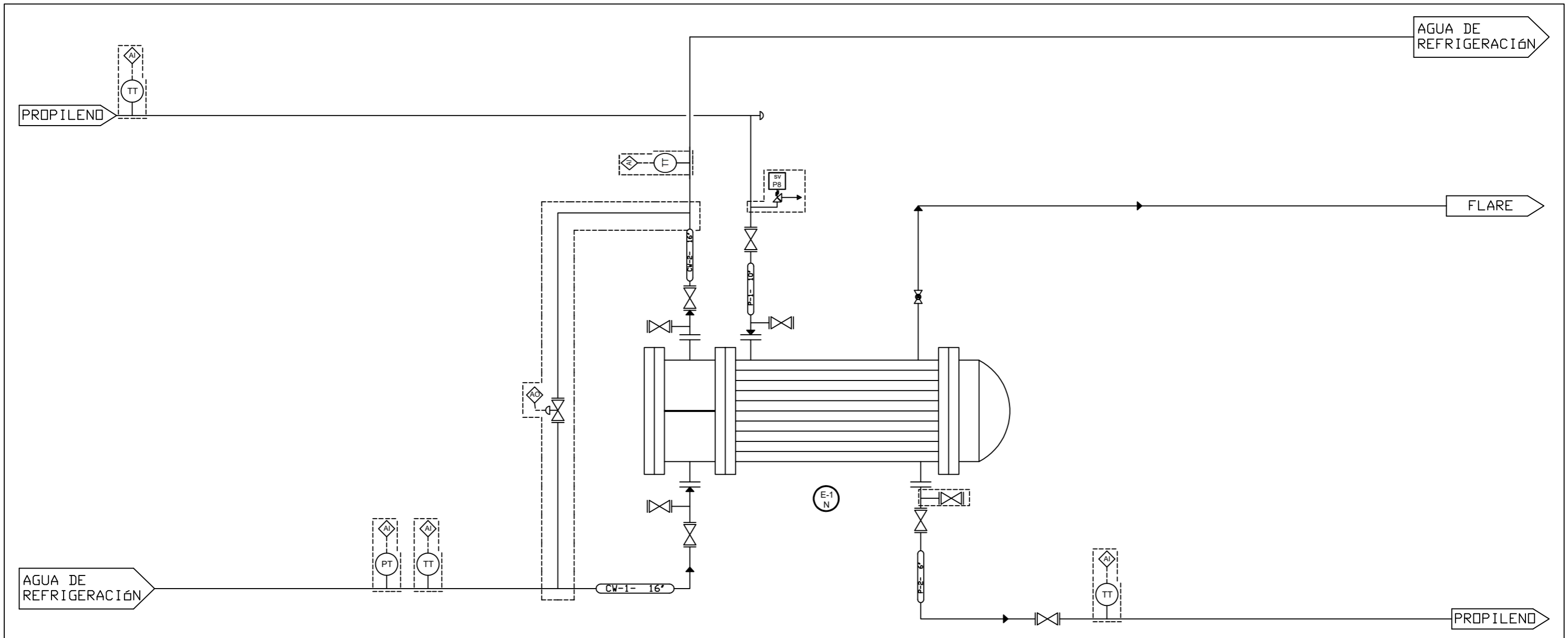
### **4.1 Diagramas de proceso**



REV. NAME	REVISION	DATE
R. 0	Delineación del Diagrama de bloques	03/2021

DRAWING NAME	Unidad de condensación de propileno - Diagrama de bloques
DRAWING NUMBER	B1-0401-1P

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI	
DOW CHEMICAL IBERICA S. L.	
TARRAGONA	
AUTHOR	
IVAN R. R.	



Stream name	P-1- 10"	P-2- 8"	CW-1- 16"	CW-2- 16"
Vapour fraction	1	0	0	0
Temperature (°C)	63,3	28,31	27	30,64
Pressure (kg/cm2)	14,333	14,238	6,033	5,723
Mass flow (ton/h)	64	64	1650	1650
Mass density (kg/m3)	25,26	501,7	1006	1003
Viscosity (Pa·s)	1,09E-05	6,49E-05	8,45E-04	7,71E-04
Heat Capacity (kJ/kg·°C)	1,88	2,83	4,32	4,32
Thermal Conductivity (W/m·°C)	0,023	0,107	0,615	0,621

GENERAL NOTES

----- Modificaciones HAZOP y mejoras para el mantenimiento

REV.	NAME	REVISION	DATE
R. 0		Delineación del PFD	03/2021
R. 1		Estudio de seguridad, HAZOP	05/2021
R. 2		Mejoras para el mantenimiento de las unidades	05/2021

DRAWING NAME

Unidad de condensación de propileno - PFD

DRAWING NUMBER

B1-0402-2P


UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

DOW CHEMICAL IBERICA S. L.

TARRAGONA

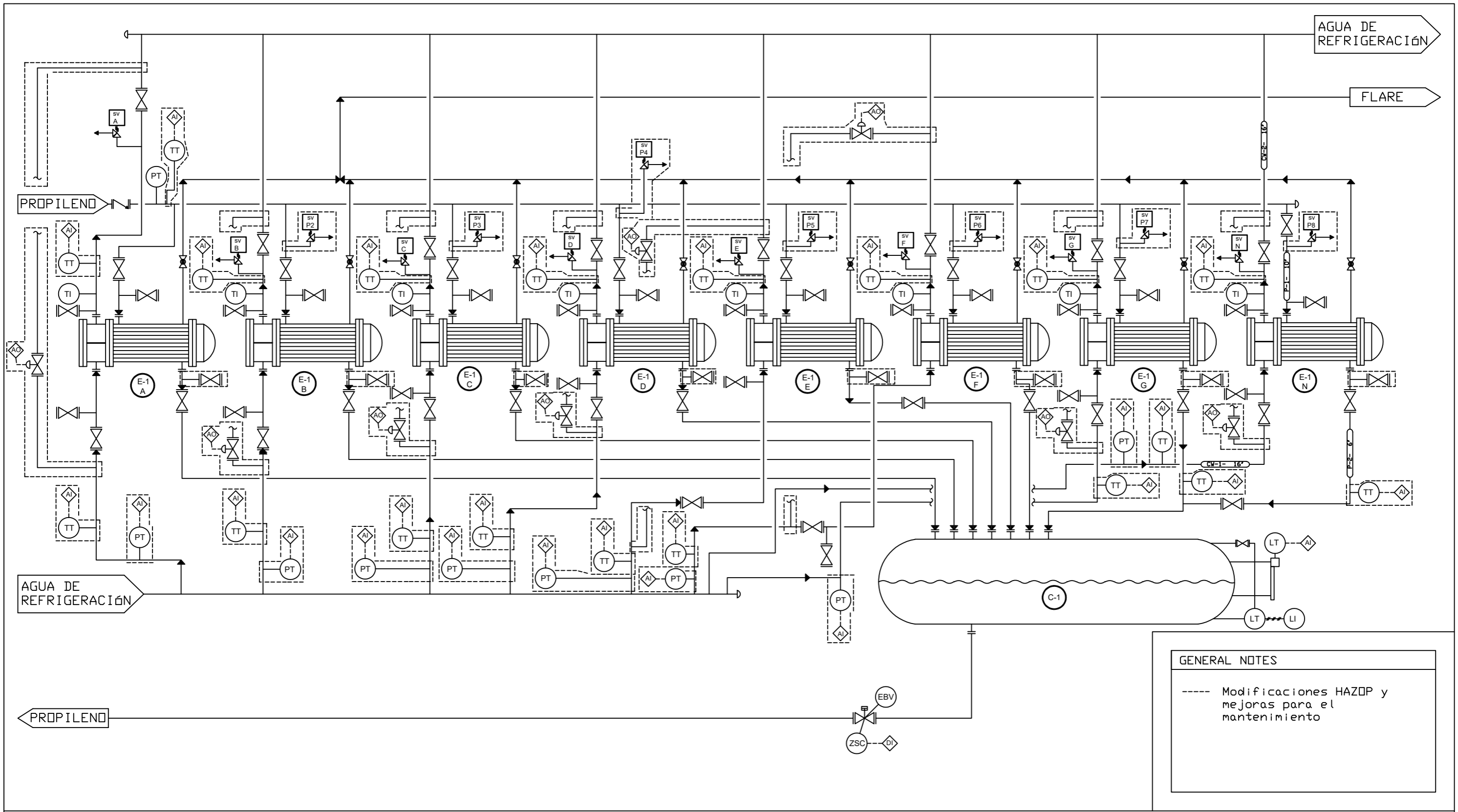
AUTHOR

IVAN R. R.



CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK



**GENERAL NOTES**

----- Modificaciones HAZOP y mejoras para el mantenimiento

REV.	NAME	REVISION	DATE
R. 0		Delineación del P&ID	03/2021
R. 1		Estudio de seguridad, HAZOP	05/2021
R. 2		Mejoras para el mantenimiento de las unidades	05/2021

**DRAWING NAME**

Unidad de condensación de propileno - P&ID

---


**DRAWING NUMBER**

B1-0403-3P

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
 DOW CHEMICAL IBERICA S. L.  
TARRAGONA  
 AUTHOR

---

IVAN R. R.



## 4.2 Diseños

### 4.2.1 Diseño de tuberías

Como previamente se había comentado, en la próxima parada se dejarán unas esperas preparadas para el conexionado de las líneas de entrada y salida del intercambiador nuevo.

Estas se deben dimensionar y validar para los corrientes de propileno y agua de refrigeración. Para la validación, no se deben sobrepasar los rangos de velocidades límites estipulados para gases y líquidos. Los límites se muestran en la tabla 4.2.1. La metodología de cálculo se muestra en el anexo B.1.

Tabla 4.2.1. Límite de las velocidades según el estado del fluido.

Fase	Máxima (m/s)	Normal (m/s)	Mínima (m/s)
Gas	40	20	4,5
Líquido	4,5	2,0	1,0

Los datos para el diseño según la normativa ASME B31.1 se muestran en la tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.2. Datos para el diseño según norma ASME B31.1.

Variable	P-1- 10"	P-2- 6"	CW-1- 16"	CW-2- 16"
Temperatura de diseño (°C)	94	94	94	94
Presión de diseño (kgf/cm <sup>2</sup> )	18,3	18,3	18,3	18,3
Eficiencia de soldadura	0,85	0,85	0,85	0,85
Corrosión admisible (mm)	1	1	1	1

Con los datos comentados, los resultados obtenidos para las diferentes líneas se muestran en la tabla 4.2.3.

Tabla 4.2.3. Resultados obtenidos para cada línea.

Variable	P-1- 10"	P-2- 6"	CW-1- 16"	CW-2- 16"
Espesor mínimo (mm)	2,35	1,45	3,50	3,50
Tolerancia del material (mm)	1,00	1,00	1,00	1,00
Margen de adelgazamiento (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00
Espesor ordenado (mm)	4,35	3,45	5,50	5,50
Espesor normalizado (mm)	6,35	7,11	6,35	6,35

Como se puede observar en la tabla 4.2.3, en el caso de las tuberías de agua el espesor normalizado pertenece a una tubería de Sch 10, y es mayor al espesor calculado teniendo en cuenta la tolerancia del material y la corrosión admisible.

Por otro lado, en el caso del propileno, la tubería de entrada y de salida tienen diferentes tipos. Por una parte, la de entrada de 10" tiene un espesor normalizado que pertenece a una tubería de Sch 20, mientras que la de salida, de 6", el espesor pertenece a una tubería de Sch 40.

La presión máxima permisible de trabajo (M.A.W.P.) y la presión de prueba hidráulica de las tuberías de propileno y agua de refrigeración, se muestran en la tabla 4.2.4.

Tabla 4.2.4. Resultados obtenidos para las líneas de propileno y agua.

Variable	Valor
M.A.W.P. (kgf/cm <sup>2</sup> )	20,11
Presión hidráulica (kgf/cm <sup>2</sup> )	26,14

Una vez obtenidos los espesores normalizados para cada una de las líneas, se pasa a validar los resultados con las velocidades de cada fluido. En la tabla 4.2.5 se encuentran las velocidades de los fluidos, y en la tabla 4.2.1 los límites que no se pueden rebasar para tener un diseño seguro y que no se produzcan erosiones internas graves en las paredes.

Tabla 4.2.5. Velocidades de los fluidos en cada línea.

Variable	P-1- 10"	P-2- 6"	CW-1- 16"	CW-2- 16"
Velocidades (m/s)	13,3	1,96	3,74	3,75

Quedan validados los perfiles de tuberías escogidos con su espesor. A continuación, en la tabla 4.2.6, se muestra la información para cada una de las líneas.

Tabla 4.2.6. Información descriptiva de cada línea.

Línea	Fluido /Fase	OD (mm)	Esp. Norm. (mm)	Velocidad (m/s)
P-1- 10"	Propileno / Gas	273	6,35	13,3
P-2- 6"	Propileno / Líquido	168,3	7,11	1,96
CW-1- 16"	Agua / Líquido	406,4	6,35	3,74
CW-2- 16"	Agua / Líquido	406,4	6,35	3,75

#### 4.2.1.1 Cálculo del aislamiento térmico de las tuberías

Según la normativa vigente, ninguna superficie que un operario pueda tocar debe estar por encima de los 60 °C [2]. Como la línea de propileno en la entrada del intercambiador oscila a una temperatura superior a la permitida, se decide realizar un estudio del aislamiento necesario para la tubería de propileno gas. La metodología de cálculo se muestra en el anexo B.1.1.

Como primera premisa, el espacio no es un limitante, por lo que no es necesario irnos a productos más caros para disminuir espesores del material usado como aislante.

En el caso de estudio, se hará uso de uno de los productos del catálogo de la empresa Rockwool, en concreto, la Manta 129 [3]. Las principales propiedades de este aislamiento se pueden observar en la tabla 4.2.7.

Tabla 4.2.7. Propiedades de la Manta 129 [4].

Propiedades	Valor	Norma
Densidad nominal (kg/m <sup>3</sup> )	70	EN 1602
Conductividad térmica (W/m·K)	0,078	EN 12667
Reacción al fuego (Euroclase)	A1 (incombustible)	EN 13501.1
Temperatura máxima (°C)	250	EN 14706

El sistema de estudio se asemeja al descrito en la figura 4.2.1.

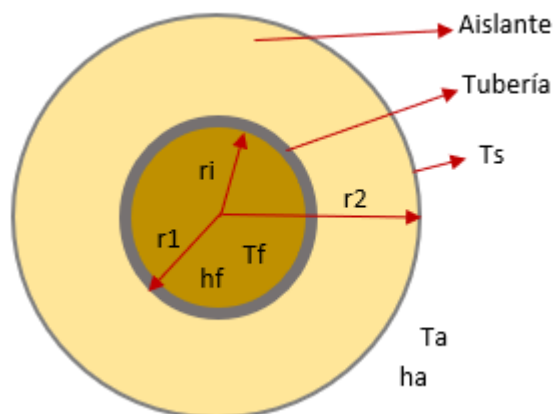


Figura 4.2.1. Diagrama representativo de la tubería con el aislante.

Los datos para el dimensionamiento del aislante se pueden observar en la tabla 4.2.8. Cabe destacar que en el caso de las temperaturas se tienen en cuenta las más extremas.

Tabla 4.2.8. Datos para el cálculo del aislamiento.

Variable	Valor
*Temperatura del fluido, Tf (°C)	82,3
Temperatura ambiental máxima, Ta (°C)	40
Temperatura máxima en la superficie (°C)	60
Conductividad térmica acero (W/m·K)	54
Conductividad térmica manta 129 (W/m·K)	0,078
Velocidad del aire (m/s)	2,78

\*La temperatura del fluido se obtiene aplicando un 30 % a la nominal para tener en cuenta posibles picos.

Una vez determinados los datos para encontrar las dimensiones necesarias de aislamiento, se pasa al cálculo. Para el dimensionamiento se ha tenido en cuenta que la tubería tendrá posicionamiento vertical y horizontal, factor que influye en los resultados obtenidos. En la tabla 4.2.9 se pueden observar los resultados obtenidos.

Tabla 4.2.9. Resultados del cálculo de aislamiento.

Variable	Horizontal	Veritcal
Coficiente de transporte de calor del propileno (W/m <sup>2</sup> ·K)	413,1	413,1
Coficiente de transporte de calor del aire exterior (W/m <sup>2</sup> ·K)	6,05	6,85
Espesor necesario de aislamiento (mm)	15,36	13,51
Temperatura máxima en superficie (°C)	59	59
Espesor comercial (mm)	20	20

Aplicando los espesores comerciales, nos queda una temperatura máxima de superficie de 56 °C, dejando validado el espesor obtenido.

## 4.2.2 Diseño del intercambiador (E-1-N)

La unidad debe validar las condiciones proporcionadas por la empresa. Para realizarlo, se debe encontrar un modelo de cálculo que defina las condiciones deseadas y, de esa forma, definir el comportamiento del equipo. Posteriormente, se podrá observar dicha actuación frente a un aumento de carga o frente a variaciones de temperaturas de entrada, y así se podrá conocer el caudal máximo de propileno que se puede introducir dentro de la unidad manteniendo la condensación total. Además, se observarán casos donde se varíen la temperatura y el caudal de entrada del propileno para ver el comportamiento de dicho intercambiador.

Cabe mencionar que los datos proporcionados por la empresa son datos aproximados. No se ha podido acceder a datos reales de campo, como historiales de caudales ni de otras condiciones, por lo que el diseño se basa en unos datos que pueden asociar cierto error. Para basarnos en unos datos lo más reales posibles se opta en realizar una simulación vía ASPEN HYSYS.

Después de realizar la simulación con Aspen, se proseguirá con el método matemático teniendo como referencia los datos obtenidos en HYSYS.

### 4.2.2.1 Consideraciones generales

El intercambiador es de tipo tubos carcasa, con 2 pasos en tubos y 1 en carcasa. Por tubos se localiza el agua de refrigeración mientras que por carcasa fluye el propileno.

Para obtener los resultados más cercanos a la realidad posible, se ha visto necesario realizar la partición de 3 zonas en el intercambiador. Estas se basan en el comportamiento del propileno, que en primera instancia padece una bajada de temperatura hasta llegar al punto de condensación, donde sigue cediendo calor para producirse el cambio de estado. Una vez completado el cambio de estado, se produce otra bajada de temperatura hasta la salida de la unidad.

Las 3 zonas vistas desde el comportamiento del propileno, suponen 6 etapas de intercambio de calor para el lado del agua de refrigeración antes de salir del equipo.

A continuación, en la figura 4.2.2 se muestra un esquema simplificado donde se puede observar las diferentes zonas/etapas del intercambiador.

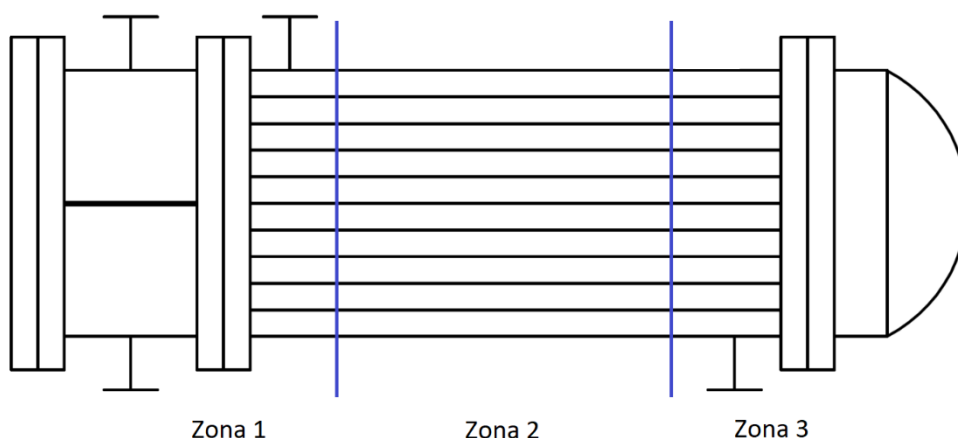


Figura 4.2.2. Representación gráfica de las zonas del intercambiador.

Cabe destacar que, para los cálculos realizados, las propiedades de los fluidos se computan en función de la temperatura. Los datos se han extraído de la herramienta Aspen HYSYS y se han obtenido rectas de tendencia en función de la temperatura. Este ejercicio se puede observar en el anexo A.

## 4.2.2.2 Validación de las condiciones proporcionadas

Los datos proporcionados se pueden observar en la tabla 4.2.10. Son aproximaciones de las condiciones deseadas.

Los datos pertenecientes a la geometría se han extraído de algunos planos que se facilitaron de los actuales intercambiadores en planta.

Tabla 4.2.10. Datos de referencia.

Variable	Propileno (Carcasa)	Agua de refrigeración (Tubos)
Caudales (kg/h)	64000	1650000
Temperaturas de entrada (°C)	63,3	27
Temperaturas de salida (°C)	28,31	30,64
Perdida de carga admisible (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,19	0,62
Presión de entrada (kgf/cm <sup>2</sup> )	14,333	6,033
Pérdida de carga (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,095	0,31
Nº tubos	3069	
Coefficiente global de transferencia de calor "U" (W/m <sup>2</sup> °C)	1292	
Tipo de intercambiador (TEMA)	AEM	
Shell ID (mm)	1527	
Tube OD (mm)	19,05	
Tube ID (mm)	18,00	
Longitud de tubos (mm)	6383	
Pitch ratio	1,3333	
Disposición de tubos	Triangular	

La validación del equipo depende del valor del coeficiente global de transferencia de calor. Para ello se utilizan dos procesos de cálculo; el método de temperatura logarítmica media (LMTD) junto con el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor de ambos fluidos. Mezclando dichos procesos, se puede llegar a obtener un modelo matemático próximo a la realidad, que puede simular el comportamiento del equipo frente a situaciones diversas, cambios de caudales, cambios de temperatura de entrada, cambios en el dimensionamiento, etc.

La metodología de cálculo se puede observar en los anexos B.2.1.

Además, se realizará la simulación con el programa ASPEN exchanger Design & Rating, para ver los resultados que se obtienen con un simulador comercial, y poder obtener resultados más reales a los datos proporcionados que, tal y como se ha mencionado anteriormente, son aproximaciones.

Los datos obtenidos con ASPEN serán la base desde donde se van a observar diferencias y discrepancias obtenidas en los cálculos matemáticos.

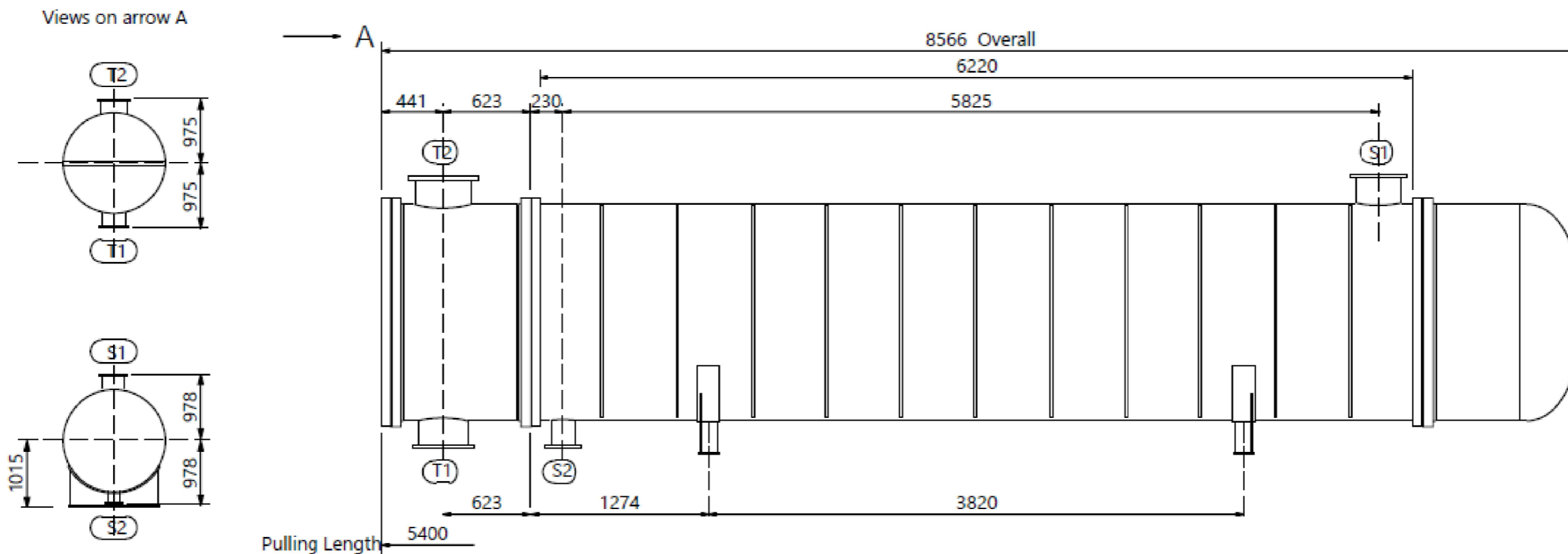
## 4.2.2.2.1 Simulación con el programa ASPEN exchanger Design &amp; Rating

Se ha realizado la simulación con los datos propuestos por la empresa para obtener un resultado con el programa ASPEN, y así poder comparar con los resultados obtenidos con el modelo matemático.

A continuación, se muestra la hoja de especificación del intercambiador, obtenida una vez realizada la simulación con los datos facilitados por la empresa.

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company: Universitat Rovira i Virgili / DOW Chemical																	
2	Location: Tarragona																	
3	Service of Unit					Our Reference:												
4	Item No.:					Your Reference:												
5	Date:		Rev No.:			Job No.:												
6	Size: 1524 - 6368		mm		Type: AEM Horizontal		Connected in: 1 parallel			1 series								
7	Surf/unit(eff.)		1142,6		m <sup>2</sup>		Shells/unit		1		Surf/shell(eff.)		1142,6		m <sup>2</sup>			
8	<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>																	
9	Fluid allocation				Shell Side				Tube Side									
10	Fluid name				Propylene				Water									
11	Fluid quantity, Total				kg/h				64000				1650000					
12	Vapor (In/Out)				kg/h		64000		0		0		0		0			
13	Liquid				kg/h		0		64000		1650000		1650000		1650000			
14	Noncondensable				kg/h		0		0		0		0		0			
15																		
16	Temperature (In/Out)				°C		63,3		29,66		27		30,62					
17	Bubble / Dew point				°C		36,26 / 36,35		/		/		/		/			
18	Density		Vapor/Liquid		kg/m <sup>3</sup>		26,45 /		/ 505,68		/ 997,94		/ 997,17					
19	Viscosity				mPa-s		0,0104 /		/ 0,095		/ 0,8561		/ 0,7899					
20	Molecular wt, Vap						42,08											
21	Molecular wt, NC																	
22	Specific heat				kJ/(kg-K)		1,775 /		/ 2,933		/ 4,191		/ 4,19					
23	Thermal conductivity				W/(m-K)		0,0238 /		/ 0,0988		/ 0,6031		/ 0,6078					
24	Latent heat				kJ/kg		329,4											
25	Pressure (abs)				kgf/cm <sup>2</sup>		15,333		15,261		7,033		6,505					
26	Velocity (Mean/Max)				m/s		1,52 / 3,8				1,73 / 1,74							
27	Pressure drop, allow./calc.				kgf/cm <sup>2</sup>		0,19		0,072		0,62		0,528					
28	Fouling resistance (min)				m <sup>2</sup> -K/W		0,0001				0,0002		0,00026		Ao based			
29	Heat exchanged		6950,8		kW				MTD (corrected)		7,27		°C					
30	Transfer rate, Service		836,8		Dirty		840		Clean		1199,6		W/(m <sup>2</sup> -K)					
31	<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>										<b>Sketch</b>							
32					Shell Side				Tube Side									
33	Design/Vacuum/test pressure		bar		19,12297/ -1,0409 /28,68445				8,33565 / -1,0409 /12,50348									
34	Design temperature				°C		130		130									
35	Number passes per shell						1		2									
36	Corrosion allowance				mm		3,2		3,2									
37	Connections		In		mm		1 304,8 / -		1 336,55 / -									
38	Size/Rating		Out				1 154,05 / -		1 387,35 / -									
39	ID		Intermediate				/ -		/ -									
40	Tube #: 3069		OD: 19,05		Tks. Average 2,11		mm		Length: 6368		mm		Pitch: 25,4		mm Tube pattern:30			
41	Tube type: Plain				Insert:None				Fin#: #/m				Material:Carbon Steel					
42	Shell		Carbon Steel		ID 1524		OD 1556		mm		Shell cover		-					
43	Channel or bonnet				Carbon Steel				Channel cover		Carbon Steel							
44	Tubesheet-stationary				Carbon Steel		-		Tubesheet-floating		-							
45	Floating head cover				-				Impingement protection		None							
46	Baffle-cross		Carbon Steel		Type		Single segmental		Cut(%d)		29,79		VertiSpacing: c/c 533		mm			
47	Baffle-long -				Seal Type				Inlet		445,48				mm			
48	Supports-tube		U-bend		0				Type									
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint				Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')									
50	Expansion joint -				Type				None									
51	RhoV2-Inlet nozzle		2244		Bundle entrance		1096		Bundle exit		131		kg/(m-s <sup>2</sup> )					
52	Gaskets - Shell side				-		Tube side				Flat Metal Jacket Fibe							
53	Floating head				-													
54	Code requirements				ASME Code Sec VIII Div 1				TEMA class				R - refinery service					
55	Weight/Shell		28695,7		Filled with water		41135,5		Bundle		19629,6		kg					
56	Remarks																	
57																		
58																		



Nozzle Data				
Ref	OD	Wall	Standard	Notes
S1	324 mm	9,5 mm	Slip on	
S2	168 mm	7,1 mm	Slip on	
T1	356 mm	9,5 mm	Slip on	
T2	406 mm	9,5 mm	Slip on	

Design Data	Units	Shell	Channel
Design Pressure	bar	19,12	8,34
Design Temperature	°C	130	130
Full Vacuum			
Corrosion Allowance	mm	3,2	3,2
Test Pressure	bar	28,68	12,5
Number of Passes		1	2
Radiography			
PWHT			
Internal Volume	m <sup>3</sup>	5,7448	7,0461

GENERAL NOTES
TEMA Type: AEM

REV.	NAME	REVISION	DATE
R. 0		Representación de las dimensiones del equipo	05/2021

DRAWING NAME
Unidad de condensación de propileno - Dimensionamiento
DRAWING NUMBER
B1-0404-4P

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI	
DOW CHEMICAL IBERICA S. L.	
TARRAGONA	
AUTHOR	
IVAN R. R.	

Los principales resultados que extraemos de la simulación con el programa ASPEN se muestran en la tabla 4.2.11.

Tabla 4.2.11. Principales resultados de la simulación.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Área efectiva de intercambio de calor (m <sup>2</sup> )	1142,6	
Coefficiente global de transferencia de calor limpio "U" (W/m <sup>2</sup> °C)	1199,6	
*Coefficiente global de transferencia de calor "U" con fouling (W/m <sup>2</sup> °C)	840	
Calor de intercambio (kW)	6950,8	
Fracción de vapor entrada	0	1
Fracción de vapor salida	0	0
Temperaturas de entrada (°C)	27,00	63,30
Temperaturas de salida (°C)	30,62	29,66
Perdida de carga (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,528	0,072

\*El valor del Coeficiente global de transferencia de calor con fouling será el valor desde el cual se va a observar las diferencias con el método matemático.

Como se puede analizar, los resultados son próximos a los datos proporcionados por la empresa, dando una diferencia del 7% en el caso del coeficiente global de transferencia de calor limpio.

Por otra parte, se analiza que, en el caso del agua, la temperatura es muy próxima a la dada por la empresa. En cambio, en el caso del propileno se observa una diferencia de 1,3 °C.

En conclusión, el modelo simulado por el programa ASPEN es preciso y se obtienen valores muy cercanos a la realidad, lo que nos da unos valores aceptables para usarlos de referencia cara al cálculo matemático.

#### 4.2.2.2.2 Método LMTD y coeficientes de transferencia de calor de los fluidos

En este método, el cálculo del coeficiente global de transferencia se obtiene mediante los coeficientes de transferencia de calor de los distintos fluidos. En el caso del agua de refrigeración (lado tubos), se hace uso de la correlación de Dittus & Boelter [5]. Los resultados en las diferentes zonas se muestran en la tabla 4.2.12.

Tabla 4.2.12. Resultados del coeficiente de transferencia del agua mediante Dittus & Boelter.

Variable	Valor
Re	2,72E+04
Pr	5,41
Nu	159,4
Coef. en la Zona 1 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	5493
Re	2,61E+04
Pr	5,66
Nu	157
Coef. en la Zona 2 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	5389
Re	2,51E+04
Pr	5,91
Nu	155
Coef. en la Zona 3 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	5293

En el caso del propileno, como existe una condensación, no se pueden realizar los cálculos en las diferentes zonas con la misma correlación. Cuando se produce la condensación, se hace uso de una correlación específica para condensación en banco de tubos horizontales [6], mientras que en las otras dos zonas se utiliza la correlación de Zukauskas [7]. En la tabla 4.2.13 se muestran los valores obtenidos para el lado del propileno haciendo uso de las correlaciones mencionadas.

Tabla 4.2.13. Resultados del coeficiente de transferencia del propileno para la condensación y, para las otras zonas mediante Zukauskas.

Variable	Valor
Re	1,59E+05
Pr	0,92
Pr en la superficie del tubo	0,91
Nu	475
Coef. en la Zona 1 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	528,3
Coef. en la Zona 2 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	2435
Re	1,80E+04
Pr	1,72
Pr en la superficie del tubo	1,72
Nu	161
Coef. en la Zona 3 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	885,7

Una vez obtenidos los coeficientes de transferencia de calor de ambos corrientes, se pasa a realizar el cálculo de los coeficientes globales de transferencia en cada una de las áreas, mediante el método LMTD.

A continuación, se muestran los valores del calor transferido, la temperatura logarítmica media y los coeficientes globales de transferencia de calor.

Tabla 4.2.14. Resultados del coeficiente global de transferencia de calor de la unidad.

Variable	Valor
LMTD de la Zona 1	17,7
Q de la Zona 1 (kW)	892,2
U de la Zona 1 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	417,4
LMTD de la Zona 2	7,48
Q de la Zona 2 (kW)	5763
U de la Zona 2 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	1091
LMTD de la Zona 3	1,96
Q de la Zona 3 (kW)	379,2
U de la Zona 3 (W/m <sup>2</sup> ·°C)	610,1
U total (W/m <sup>2</sup> ·°C)	886,3
Q total (kW)	7034

Como se puede observar, el valor de U tiene un error del 5,5% con relación al valor obtenido con el programa ASPEN. Este error es admisible y se acepta como método correcto.

Una vez validado el modelo, se procede a la obtención tanto de las temperaturas de salida como las del interior entre las zonas delimitadas.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 4.2.15 y 4.2.16.

Tabla 4.2.15. Temperaturas de salida del propileno mediante el método LMTD.

Variable	Propileno
Temperatura de entrada Zona 1 (°C)	63,30
Temperatura de salida Zona 1 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 3 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 3 (°C)	28,96

Tabla 4.2.16. Temperaturas de salida del agua de refrigeración mediante el método LMTD.

Variable	Agua de refrigeración
Temperatura de entrada a la unidad (°C)	27,00
Temperatura de salida etapa 1, 1er paso (°C)	27,23
Temperatura de salida etapa 2, 1er paso (°C)	28,68
Temperatura de salida etapa 3, 1er paso (°C)	28,78
Temperatura de salida etapa 4, 2o paso (°C)	28,87
Temperatura de salida etapa 5, 2o paso (°C)	30,33
Temperatura de salida etapa 6, 2o paso (°C)	30,56

Con las temperaturas obtenidas mediante el método de cálculo, se ha podido realizar un perfil a lo largo del intercambiador. En la figura 4.2.3 se puede ver el perfil de temperaturas extraído.

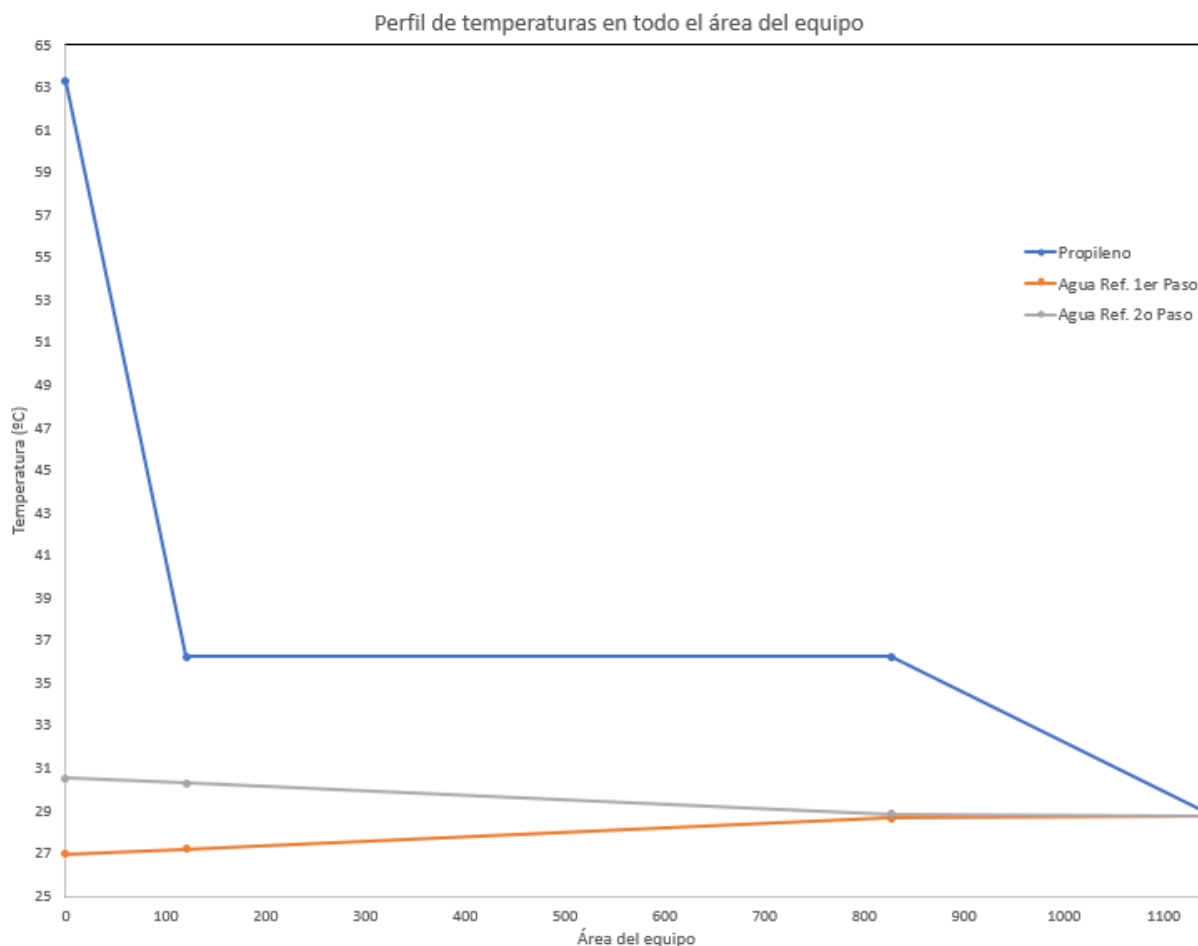


Figura 4.2.3. Perfil de temperaturas en toda el área del intercambiador.

Como se puede comprobar, los resultados obtenidos son cercanos a los obtenidos vía el simulador Aspen, por eso, se da por validado el método matemático.

#### 4.2.2.2.3 Cálculo de la pérdida de carga

Para el cálculo de la pérdida de carga sólo se ha podido realizar la del lado de agua de refrigeración, puesto que no se ha dispuesto de datos suficientes para el cálculo del lado propileno, para cada una de las etapas/zonas. El proceso de cálculo se puede observar en el anexo B.2.2.

Para el lado del agua de refrigeración, se ha seguido el método de cálculo según Kuppan [8]. Los resultados se pueden observar en la tabla 4.2.17. Y, en el caso del propileno los datos se extraen del programa Aspen.

Tabla 4.2.17. Resultados de la caída de presión en lado tubos.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Pérdida de carga admisible (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,62	0,19
Pérdida de carga según datos proporcionados (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,31	0,095
Pérdida de carga obtenida calculadas o mediante Aspen (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,26	0,072

Se puede analizar, que la caída de presión calculada/simulada, producida en ambos lados (tubos y carcasa), contienen un error muy reducido en base al dato proporcionado por la empresa. Y, que el valor obtenido esta por debajo de la mitad del valor admisible.

#### 4.2.2.3 Simulación de la unidad con las nuevas condiciones

Una vez obtenido el método matemático para basar el simulador, se procede a realizar la simulación de la unidad en las distintas condiciones:

- Aumento del caudal de propileno al máximo permitido cumpliendo la condensación total del corriente.
- Aumento de la temperatura un 20% manteniendo el caudal nominal, dejando la temperatura de entrada en 76 °C.
- Aumento de un 10% del caudal y 10% de la temperatura del propileno, pasando de 64 ton/h a 76,8 ton/h y de 63,3 °C a 69,63 °C.

##### 4.2.2.3.1 Aumento del caudal de propileno al máximo permitido

Para obtener el caudal máximo permitido que se puede introducir en el condensador, se definen dos variables delimitantes:

- La temperatura máxima a la que puede llegar el propileno en la salida del equipo con el valor de 36,2 °C. Se toma esta temperatura para asegurar la condensación total del corriente.
- La pérdida de carga en el lado propileno. Esta se obtiene mediante el programa Aspen.

Se procede a introducir los datos en la consola. Los datos introducidos se muestran en la tabla 4.2.18.

Tabla 4.2.18. Datos introducidos en el simulador.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Caudales (ton/h)	1650	-
Temperatura de entrada (°C)	27,00	63,30
Temperatura de salida (°C)	-	36,20

Se obtiene que el aumento del caudal puede llegar a ser del 35,8%, manteniendo la temperatura nominal de 63,3 °C y fijando la temperatura de salida a 36,2 °C, pero, la pérdida de carga sobrepasa la admisible, por lo que se encuentra que el aumento de caudal máximo de propileno sin sobrepasar dicho límite es igual al 33,44 %.

A continuación, en la tabla 4.2.19 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.2.19. Resultados del simulador.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Coficiente global de transferencia de calor "U" (W/m <sup>2</sup> °C)	1035	
Calor de intercambio (kW)	8973	
Temperatura salida intercambiador (°C)	31,54	34,95
Caudales (ton/h)	1650	85,40
Caída de presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,26	0,189

Además, se han calculado las temperaturas en cada zona del intercambiador, que se muestran en la tabla 4.2.20 y 4.2.21. A partir de ellas se ha realizado un perfil de temperaturas a lo largo de la unidad. Se muestra en la figura 4.2.4.

Tabla 4.2.20. Temperaturas de salida del propileno.

Variable	Propileno
Temperatura de entrada Zona 1 (°C)	63,30
Temperatura de salida Zona 1 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 3 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 3 (°C)	34,95

Tabla 4.2.21. Temperaturas de salida del agua de refrigeración.

Variable	Agua de refrigeración
Temperatura de entrada a la unidad (°C)	27,00
Temperatura de salida etapa 1, 1er paso (°C)	27,30
Temperatura de salida etapa 2, 1er paso (°C)	29,25
Temperatura de salida etapa 3, 1er paso (°C)	29,27
Temperatura de salida etapa 4, 2o paso (°C)	29,29
Temperatura de salida etapa 5, 2o paso (°C)	31,24
Temperatura de salida etapa 6, 2o paso (°C)	31,54

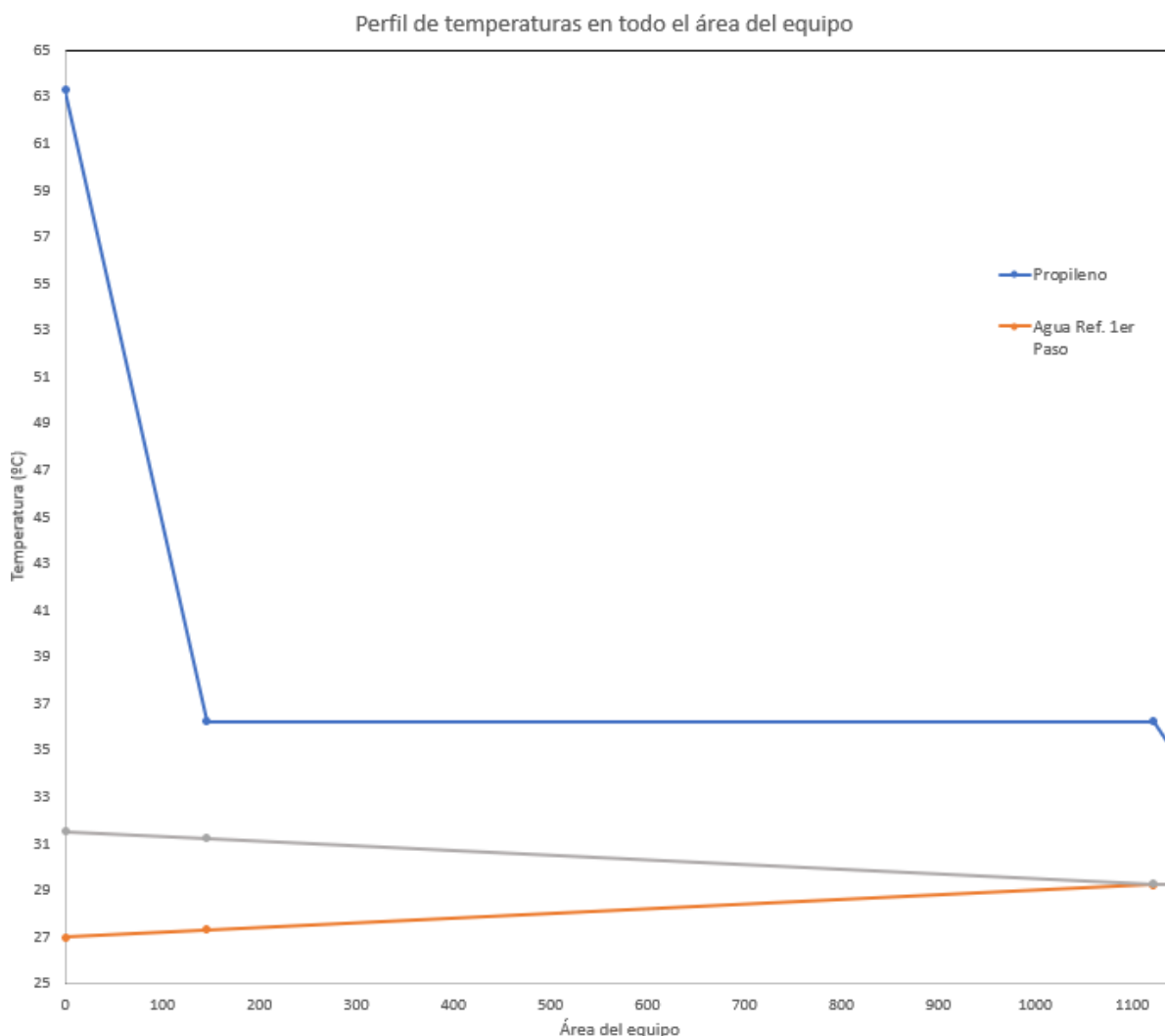


Figura 4.2.4. Perfil de temperaturas en toda el área del intercambiador.

#### 4.2.2.3.2 Aumento de un 20% de la temperatura de entrada del propileno

Se procede a introducir los datos en la consola. Los datos introducidos se muestran en la tabla 4.2.22.

Tabla 4.2.22. Datos introducidos en el simulador.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Caudales (ton/h)	1650	64,00
Temperatura de entrada (°C)	27,00	76,00

A continuación, en la tabla 4.2.23 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.2.23. Resultados del simulador.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Coefficiente global de transferencia de calor "U" (W/m <sup>2</sup> °C)	887	
Calor de intercambio (kW)	7447	
Temperatura salida intercambiador (°C)	30,77	29,15
Caída de presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,26	0,075

Además, se han calculado las temperaturas en cada zona del intercambiador, se muestran en la tabla 4.2.24 y 4.2.25. A partir de estas se ha realizado un perfil de temperaturas a lo largo de la unidad, se muestra en la figura 4.2.5.

Tabla 4.2.24. Temperaturas de salida del propileno.

Variable	Propileno
Temperatura de entrada Zona 1 (°C)	63,30
Temperatura de salida Zona 1 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 3 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 3 (°C)	29,15

Tabla 4.2.25. Temperaturas de salida del agua de refrigeración.

Variable	Agua de refrigeración
Temperatura de entrada a la unidad (°C)	27,00
Temperatura de salida etapa 1, 1er paso (°C)	27,33
Temperatura de salida etapa 2, 1er paso (°C)	28,79
Temperatura de salida etapa 3, 1er paso (°C)	28,88
Temperatura de salida etapa 4, 2o paso (°C)	28,98
Temperatura de salida etapa 5, 2o paso (°C)	30,43
Temperatura de salida etapa 6, 2o paso (°C)	30,77

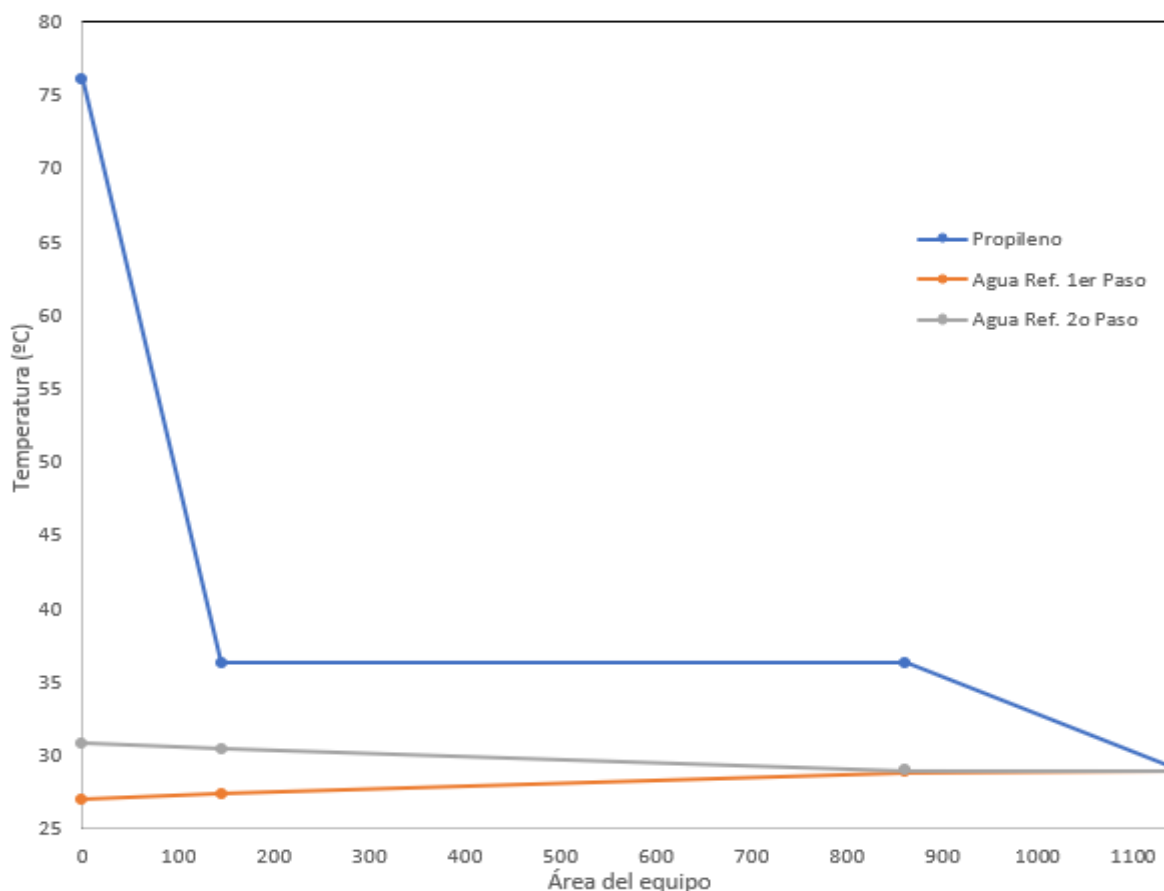


Figura 4.2.5. Perfil de temperaturas en toda el área del intercambiador.

#### 4.2.2.3.3 Aumento del 10% de la temperatura y del caudal del propileno

Se procede a introducir los datos en la consola. Los datos introducidos se muestran en la tabla 4.2.26.

Tabla 4.2.26. Datos introducidos en el simulador.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Caudales (ton/h)	1650	70,40
Temperatura de entrada (°C)	27,00	69,63

A continuación, en la tabla 4.2.27 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.2.27. Resultados del simulador.

Variable	Agua de refrigeración	Propileno
Coeficiente global de transferencia de calor "U" (W/m <sup>2</sup> °C)	934,6	
Calor de intercambio (kW)	7927	
Temperatura salida intercambiador (°C)	31,01	29,72
Caída de presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,26	0,093

Además, se han calculado las temperaturas en cada zona del intercambiador, se muestran en la tabla 4.2.28 y 4.2.29. A partir de ahí se ha realizado un perfil de temperaturas a lo largo de la unidad, se muestra en la figura 4.2.6.

Tabla 4.2.28. Temperaturas de salida del propileno.

Variable	Propileno
Temperatura de entrada Zona 1 (°C)	63,30
Temperatura de salida Zona 1 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 2 (°C)	36,26
Temperatura de entrada Zona 3 (°C)	36,26
Temperatura de salida Zona 3 (°C)	29,72

Tabla 4.2.29. Temperaturas de salida del agua de refrigeración.

Variable	Agua de refrigeración
Temperatura de entrada a la unidad (°C)	27,00
Temperatura de salida etapa 1, 1er paso (°C)	27,31
Temperatura de salida etapa 2, 1er paso (°C)	28,91
Temperatura de salida etapa 3, 1er paso (°C)	29,00
Temperatura de salida etapa 4, 2o paso (°C)	29,10
Temperatura de salida etapa 5, 2o paso (°C)	30,70
Temperatura de salida etapa 6, 2o paso (°C)	31,01

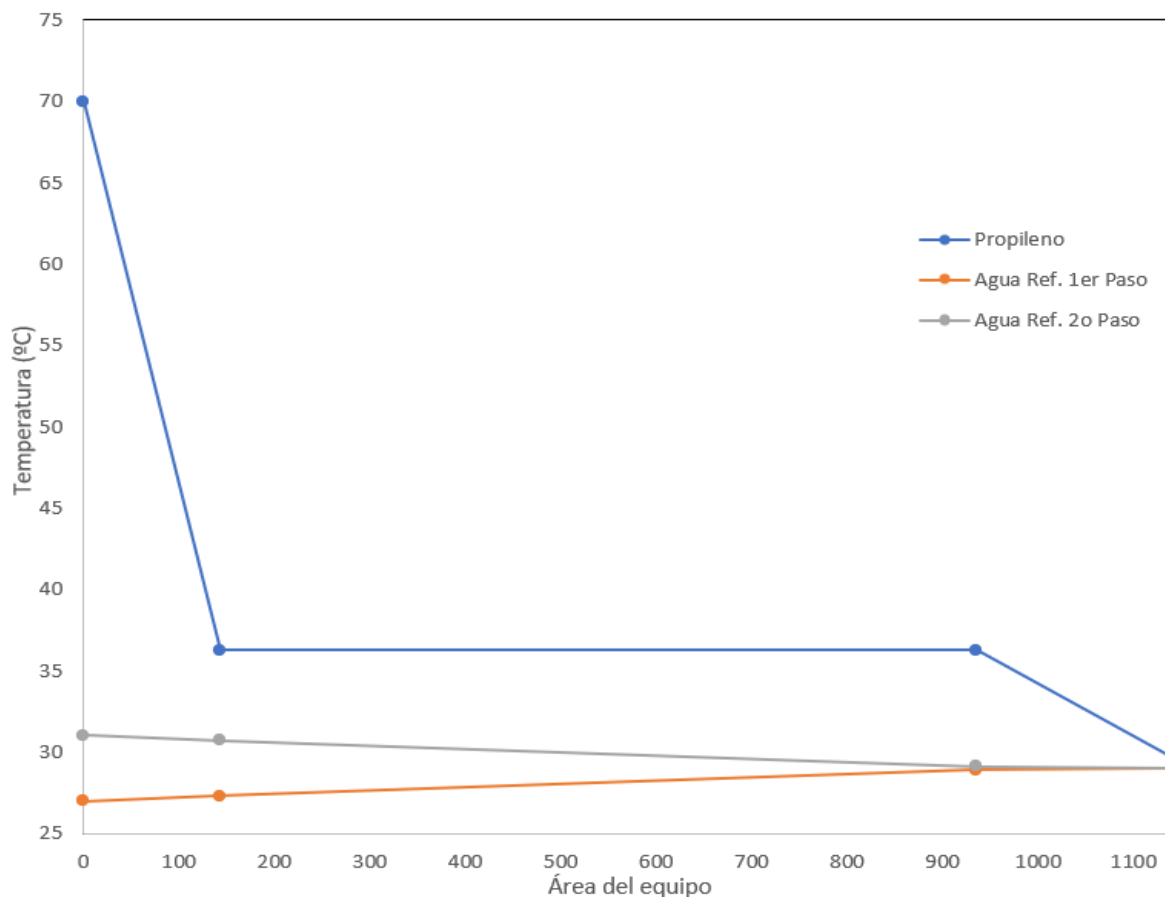


Figura 4.2.6. Perfil de temperaturas en toda el área del intercambiador.

Finalmente, después de observar los resultados obtenidos con la aplicación de aumentos de carga y temperatura, se puede concluir que el intercambiador está preparado para soportar picos del 10% o superiores en ambas variables.

#### 4.2.3 Diseño de la suportación adicional necesaria para el equipo

El diseño de la suportación del equipo se realiza mediante el programa ANSYS. De esta forma se puede realizar un estudio de las tensiones y deformaciones del material mediante elementos finitos.

Todos los puntos introducidos junto con las cargas definidas en la simulación se muestran en los anexos B.3.

A primera instancia se define el material que se requiere para la construcción del soporte. Este se muestra en la tabla 4.2.30 junto con sus principales propiedades [9].

Tabla 4.2.30. Material para la construcción del soporte adicional para la unidad.

Variable	
Material	Acero
Tipo de Acero	S 235 J0W
Límite elástico (MPa)	235
Módulo de Young (Gpa)	205
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7850

Se decide usar este acero por sus propiedades mejoradas a la corrosión atmosférica, que, siendo un material situado al exterior, este se expone a lluvias, al medio característico cercano al mar, productos que puedan surgir de posibles fugas en proceso, humos provenientes de antorcha, etc.

El dimensionamiento del soporte se basará en la restricción del límite elástico, para que las posibles deformaciones dadas al material por las cargas existentes no produzcan en él un cambio permanente. Además, se define de forma preliminar que la deformación máxima a la que se puede exponer el soporte debe ser menor a 5 mm, para no comprometer la integridad estructural de las soldaduras, del intercambiador ni la de los propios soportes.

El diseño del soporte se dividirá en dos partes para, así, realizar la simulación del mallado (Método Elementos Finitos) de una forma más sencilla y obtener resultados más cercanos a la realidad. En primer lugar, se diseñarán las patas que soportarán el peso del intercambiador y están apoyadas directamente a las vigas. Y, en segundo lugar, se simularán las vigas. Estas estarán empotradas a la estructura actual soportando todo el peso del equipo.

#### 4.2.3.1 Consideraciones previas al diseño

Para realizar el diseño del soporte, se han tomado una serie de consideraciones. Son las que siguen:

- Las vigas estarán empotradas por ambos extremos a la estructura actual que soporta los otros condensadores de propileno.
- Las patas del intercambiador estarán soldadas por los 3 puntos de conexión con las vigas donde se van a apoyar.

#### 4.2.3.2 Diseño de las patas del equipo

Para este estudio, se realiza la simulación de una sola pata, ya que se trata de un sistema simétrico donde ambas soportaran la mitad de la carga del equipo.

Se ha definido una geometría que se acomoda completamente a la estructura circular del intercambiador. En la figura 4.2.7 se puede observar la apariencia de la pata.

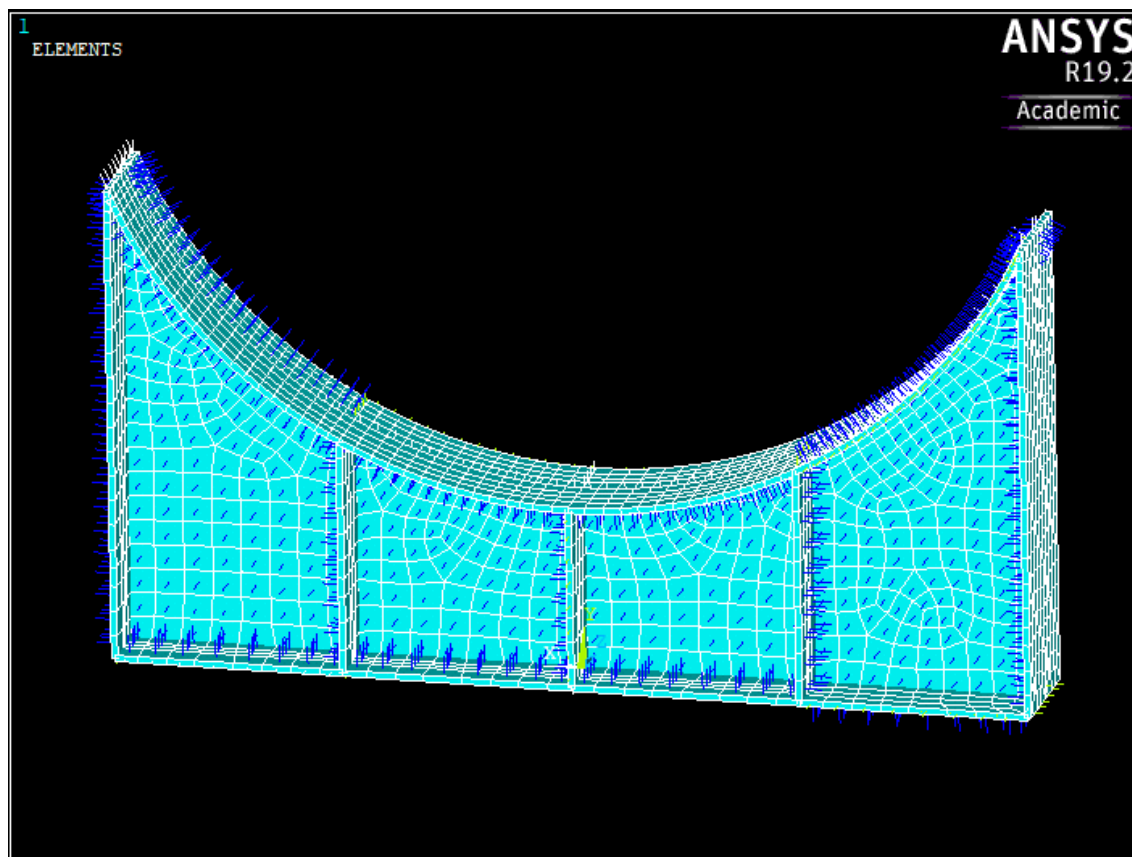


Figura 4.2.7. Geometría de la pata del intercambiador.

Tal y como vemos en la imagen, se introducen una serie de nervios a la estructura para evitar el posible pandeo que se produjera por la presión que ejercita el equipo. Además, se introduce el espesor de las placas de acero, siendo este igual a 8 mm.

Una vez obtenida la geometría del intercambiador se definen las fuerzas. En la figura 4.2.8 se muestran las cargas aplicadas.

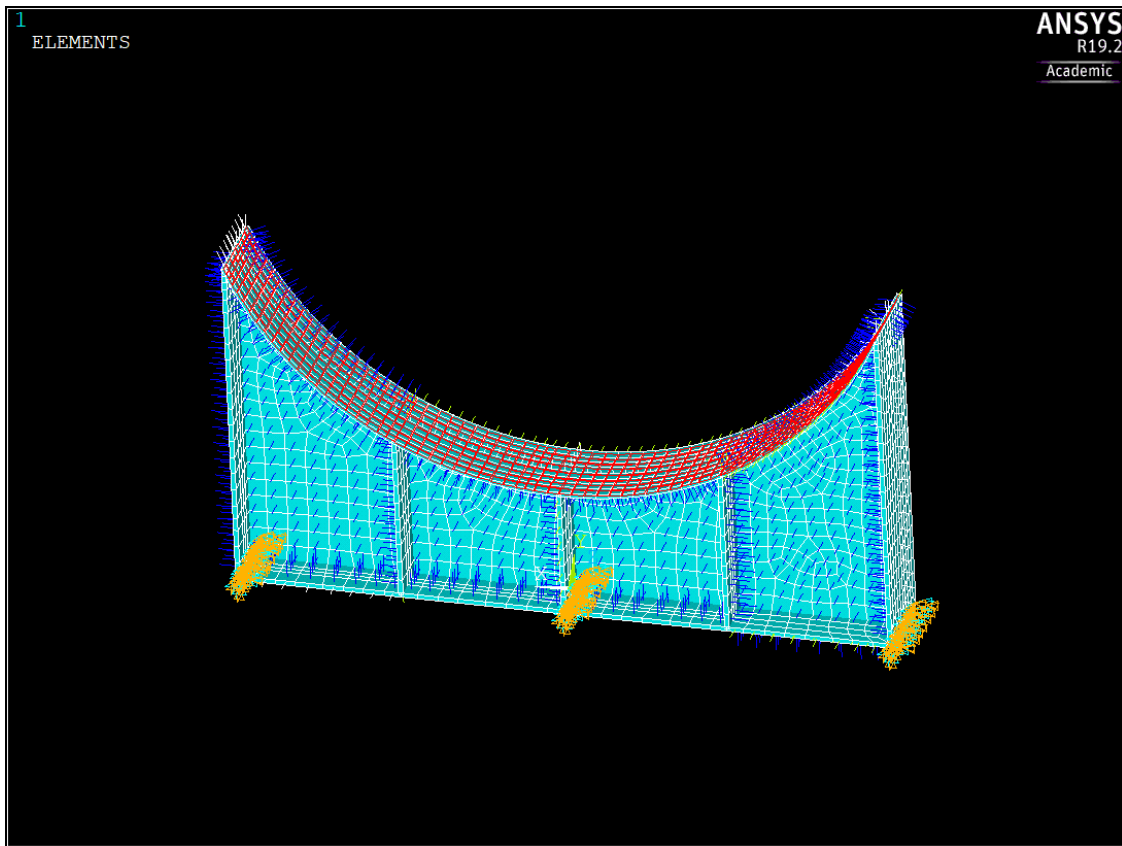


Figura 4.2.8. Cargas aplicadas a la estructura.

La fuerza que ejerce el intercambiador sobre la pata se define como una presión a lo largo del área de contacto. Además, tal y como se ha mencionado anteriormente, se definen los puntos de contacto con las vigas (Parte inferior) como soldado, es decir, mantiene un comportamiento de empotramiento.

Una vez simuladas todas las variables existentes, se resuelve el sistema dando como resultado lo mostrado en las figuras 4.2.9 y 4.2.10.

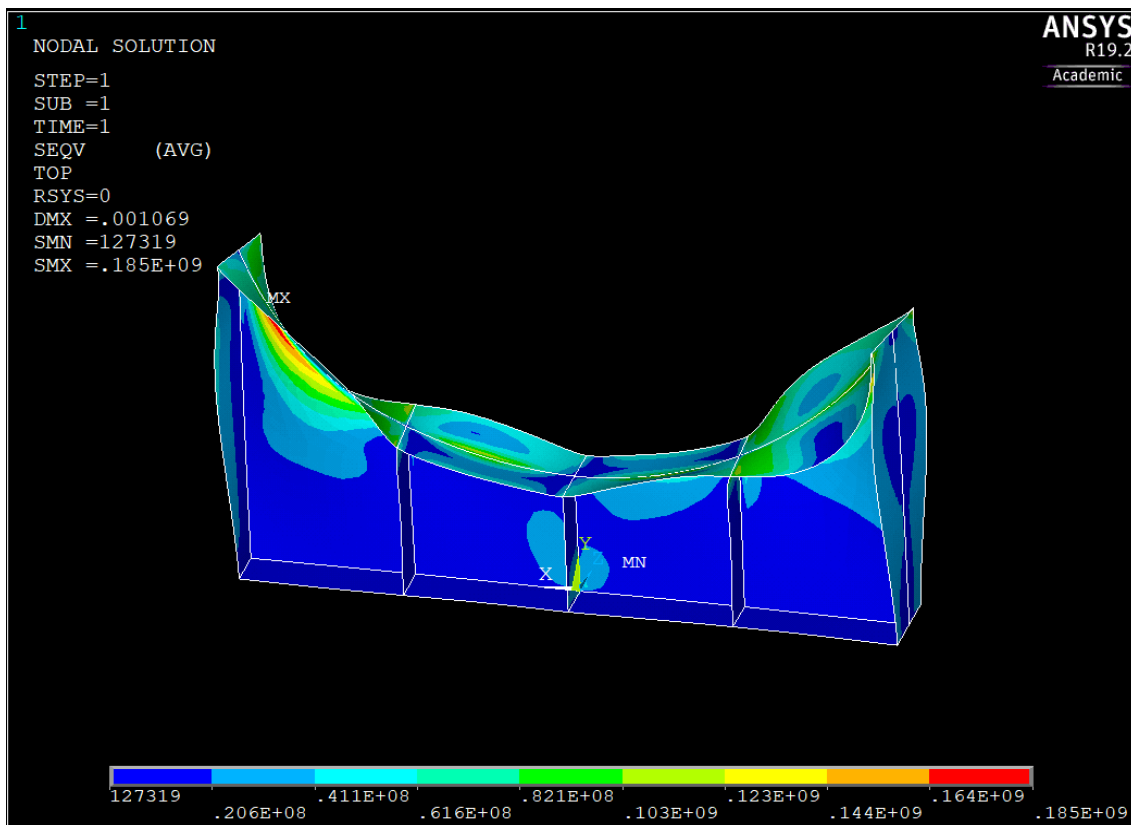


Figura 4.2.9. Resolución final del sistema.

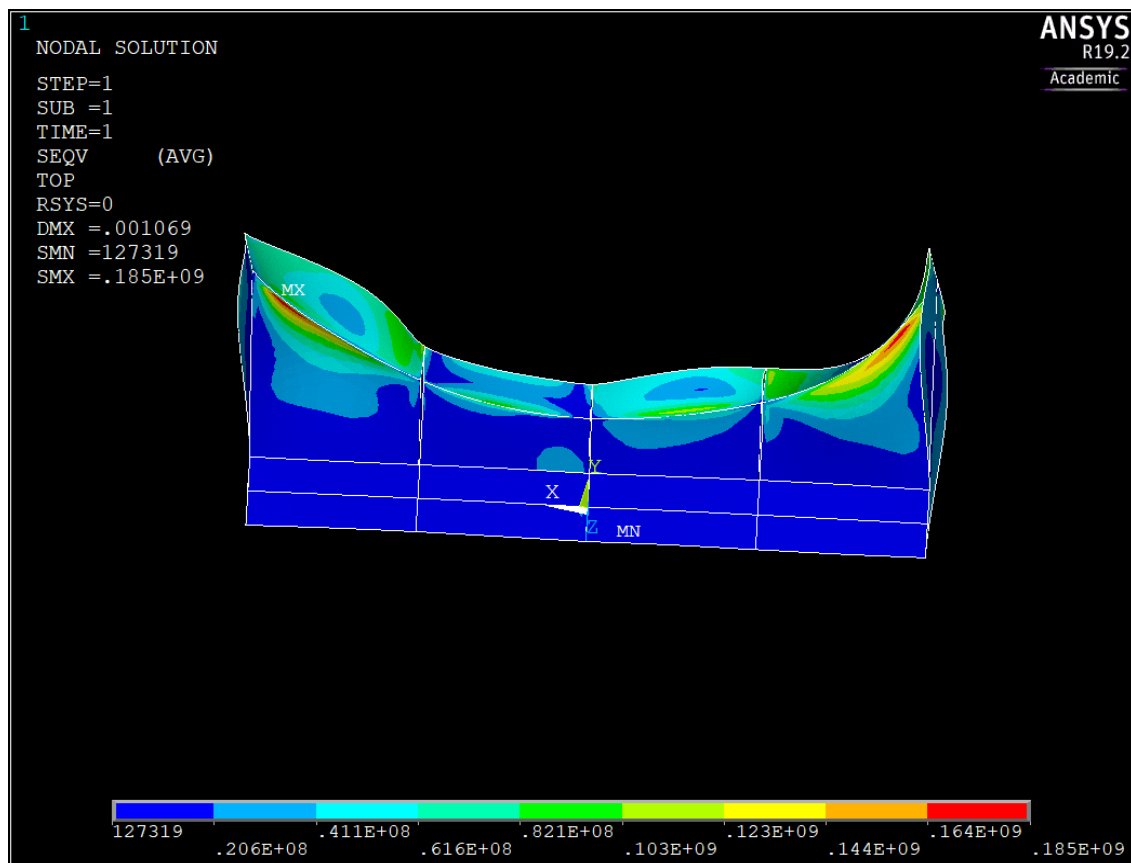


Figura 4.2.10. Resolución final del sistema. Vista desde la base.

Mediante un análisis por Von Mises se puede analizar que la tensión máxima ( $1,85E+08$  MPa) se encuentra por debajo del límite elástico del material, por lo que la deformación que se da no será permanente.

Por otra parte, la deformación que se da, que es de 1 mm, junto con la deformación de las vigas, no deberá sobrepasar la premisa expuesta para que este diseño sea adecuado y fiable.

#### 4.2.3.3 Diseño de las vigas

El perfil escogido de viga que soportará el peso del intercambiador junto con el de las patas es el de HEM 400. Las características de dicho perfil se muestran en la tabla 4.2.31 junto con un diagrama descriptivo del perfil con todas las partes en la figura 4.2.11.

Tabla 4.2.31. Dimensionamiento del perfil escogido para las vigas del sistema [10].

Perfil	h (mm)	b (mm)	e (mm)	e1 (mm)	h1 (mm)
HEM 400	432	307	21	40	298

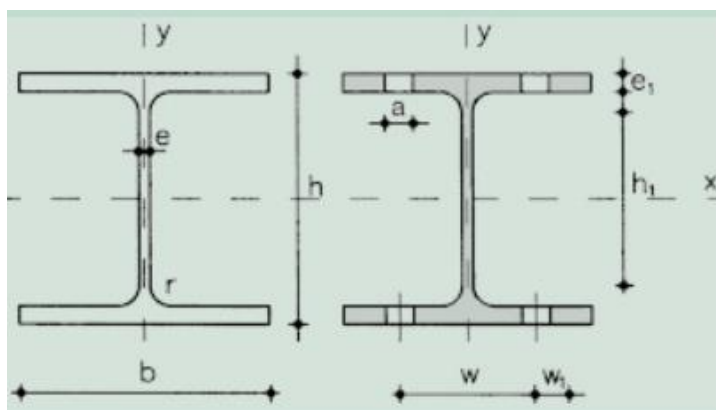


Figura 4.2.11. Diagrama del perfil viga.

A continuación, se introduce el perfil seleccionado en las vigas necesarias para el sistema aplican las fuerzas y los puntos de empotramiento de las vigas, las cuales estarán biapoyadas. En la figura 4.2.12 se muestran las vigas simuladas.

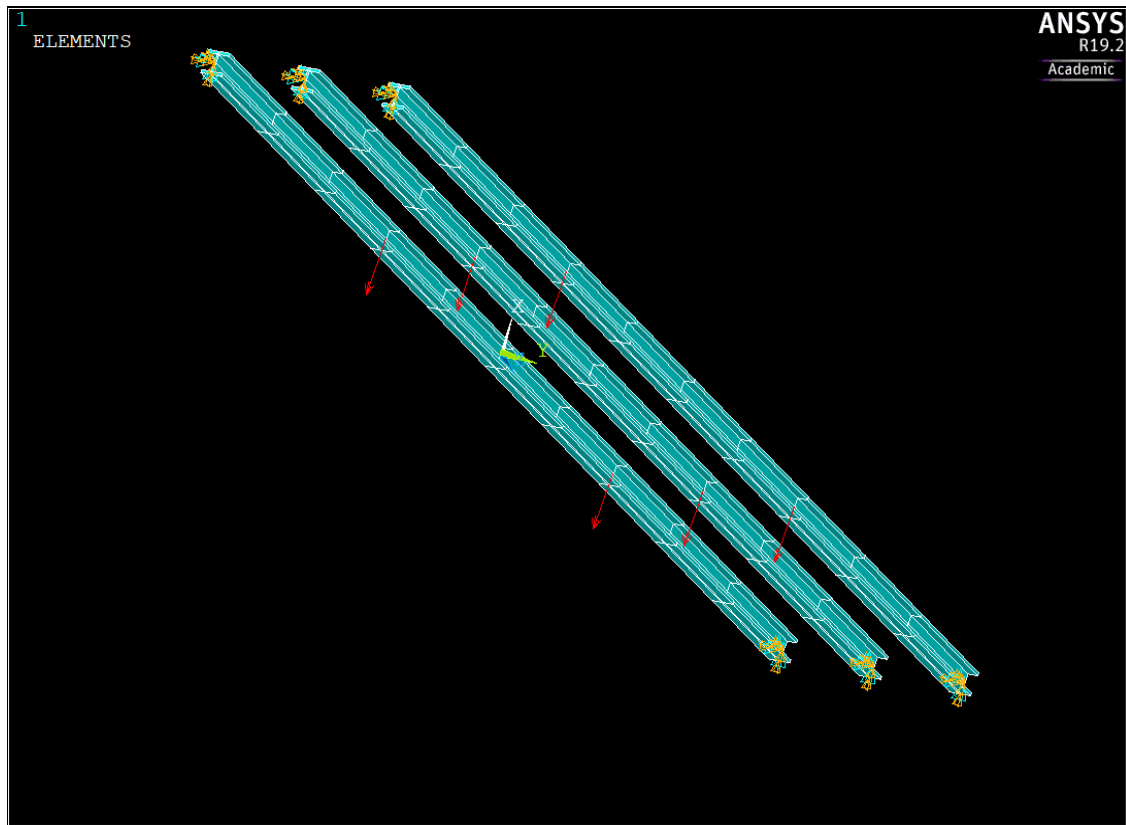


Figura 4.2.12. Vigas dimensionadas con el perfil HEM 400.

En esta imagen se observa que se ha aplicado las distintas cargas en los puntos de contacto con las patas del intercambiador.

Una vez definido el modelo, se resuelve. En la imagen 4.2.13 se muestra la solución obtenida.

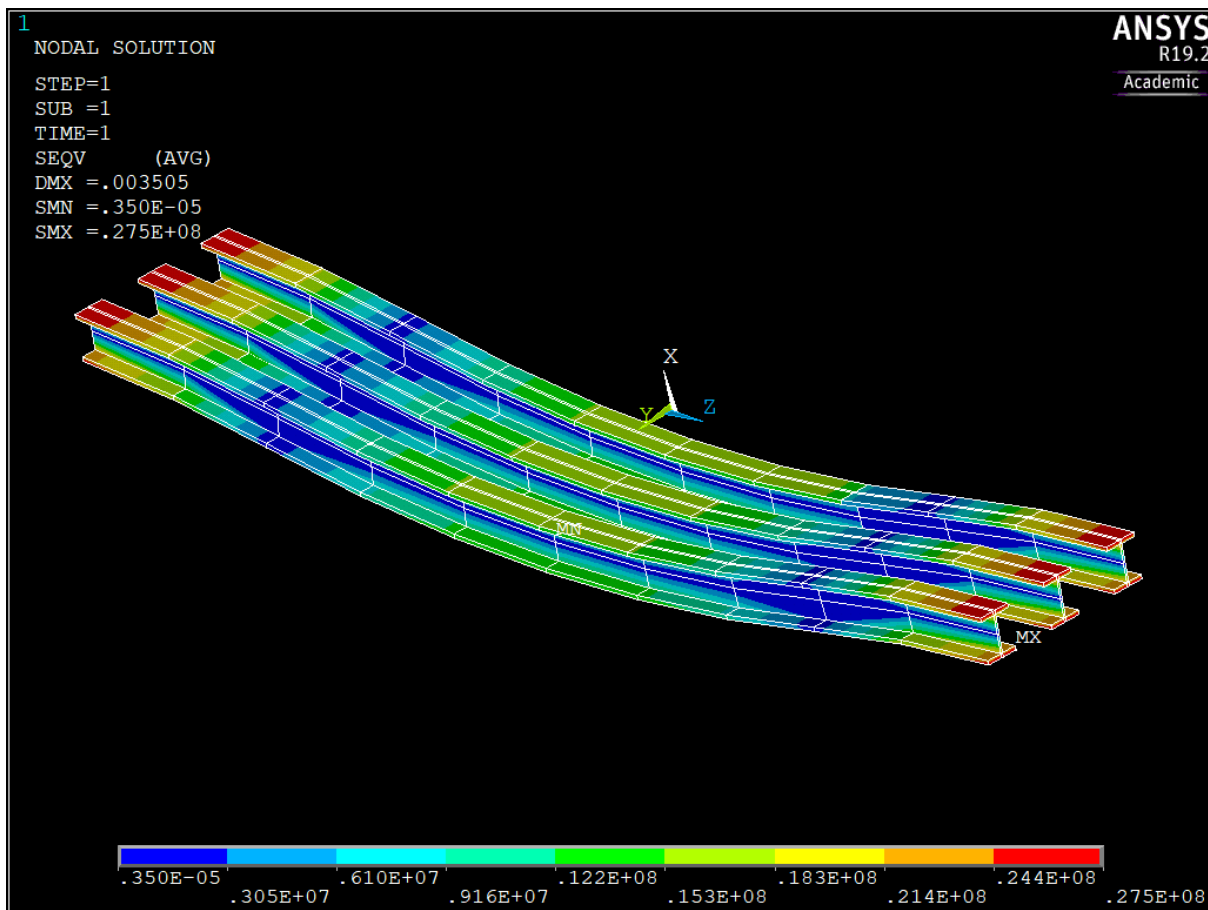


Figura 4.2.13. Resolución final de las vigas.

A partir del análisis por Von Mises, se puede determinar que la tensión máxima ( $2,75E+07$  MPa) se encuentra por debajo del límite elástico del material.

Además, la deformación que se da en las vigas, 3,51mm, junto con la deformación de la pata del equipo, 1,07 mm, dan un total de 4,58 mm de deformación, por lo que se cumple la premisa expuesta de 5 mm máximos de deformación.

## 5 Seguridad

### 5.1 Proceso de estudio

Unidad de condensación de propileno.

### 5.2 Alcance

El proceso sobre el cual se va a realizar el estudio de seguridad, HAZOP, será la zona de condensación de propileno situada después de la tercera etapa de compresión de este. El estudio comprende todos los riesgos que se puedan producir en el equipo diseñado, E-1-N.

### 5.3 Propósito del análisis

Identificar las posibles situaciones de peligro que puedan surgir a consecuencia de desviaciones en las condiciones especificadas del proceso.

#### **5.4 Modelo de estudio**

Para realizar el estudio de una forma adecuada y con mayor detalle, se realizará una separación del sistema en nodos. Los nodos definidos se pueden observar en la tabla 5.3.1.

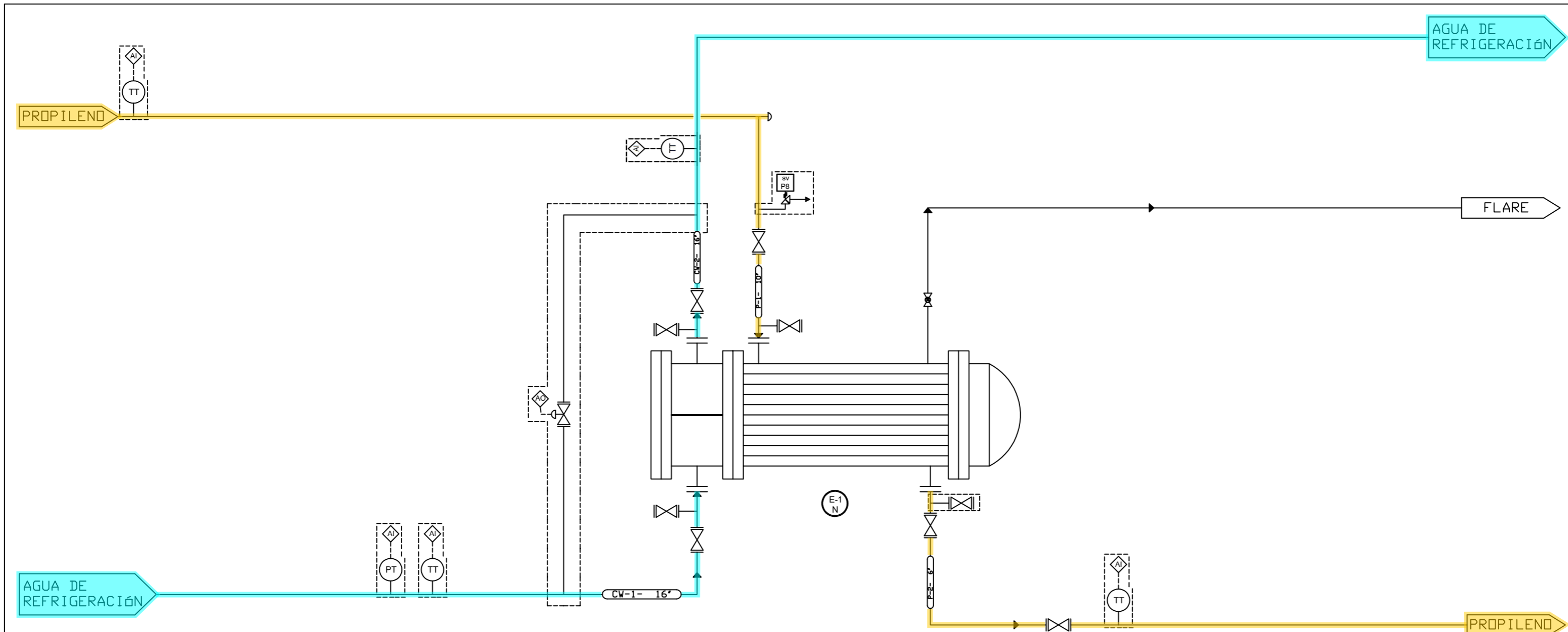
Nodo 1: Suministro y extracción del agua de refrigeración. Incluye el suministro del agua de refrigeración, paso por el equipo E-1-N y salida a colector.

Nodo 2: Condensación del propileno. Incluye el suministro de propileno al equipo E-1-N. Condensación/Enfriamiento y salida a proceso.

#### **5.5 Método HAZOP aplicado en la unidad de estudio**

En este estudio se ha aplicado una parte cuantitativa de los riesgos y la prioridad de cada una de las situaciones que se puedan producir. Las directrices que se han seguido para aplicar cada uno de los criterios mostrados en el estudio se especifican en el anexo C.

Seguidamente, se realiza el estudio HAZOP.



Stream name	P-1- 10"	P-2- 8"	CW-1- 16"	CW-2- 16"
Vapour fraction	1	0	0	0
Temperature (°C)	63,3	28,31	27	30,64
Pressure (kg/cm2)	14,333	14,238	6,033	5,723
Mass flow (ton/h)	64	64	1650	1650
Mass density (kg/m3)	25,26	501,7	1006	1003
Viscosity (Pa·s)	1,09E-05	6,49E-05	8,45E-04	7,71E-04
Heat Capacity (kJ/kg·°C)	1,88	2,83	4,32	4,32
Thermal Conductivity (W/m·°C)	0,023	0,107	0,615	0,621

GENERAL NOTES	
-----	Modificaciones HAZOP y mejoras para el mantenimiento
—	Nodo 1
—	Nodo 2

REV.	NAME	REVISION	DATE
R. 0		Delineación del PFD	03/2021
R. 1		Estudio de seguridad, HAZOP	05/2021
R. 2		Mejoras para el mantenimiento de las unidades	05/2021

DRAWING NAME	Unidad de condensación de propileno - PFD
DRAWING NUMBER	B1-0402-2P

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI	
DOW CHEMICAL IBERICA S. L.	
TARRAGONA	
AUTHOR	
IVAN R. R.	

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

Compañía: DOW Chemical Ibérica S.L.

Proyecto: Unidad de condensación de propileno

Nodo 1: Suministro y extracción del agua de refrigeración. Incluye el suministro del agua de refrigeración, paso por el equipo E-1-N y salida a colector.

Intención: Enfriar el corriente de propileno gas hasta condensarlo.

Diagrama: B1-0402-2P

Parámetros: Nivel, Flujo, Presión, Temperatura, Composición, Corrosión/Erosión, Utilities.

PG	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Acciones	C	E	P	R	Prioridad
Más	Más Nivel.	1.1. No aplica.								
Menos	Menos Nivel.	2.1. No aplica.								
No	No Flujo de Agua.	3.1. Fallo de suministro.	3.1. Temp. de propileno mayor a la deseada. No se produce la condensación. No consecuencia de seguridad.							
Menos	Menos Flujo de Agua.	4.1. Fallo de suministro.	Ver consecuencia en "3.1"							
Más	Más Flujo de Agua.	5. Fallo de suministro.	5.1. Temp. de propileno más baja que la especificada. No consecuencia de seguridad.							
Más	Más Presión en lado Agua.	6.1. Fuego externo.	6.1.1. Posible afección por radiación térmica. Aumento de presión en el lado Agua. Rotura catastrófica de tubos y entrada de propileno en el suministro de agua.	SV-N para alivio de presión.		7	0,6	1,2	5,04	Baja
		6.2. Baja demanda de agua de refrigeración en planta.	6.2.1. Augmento de caudal y presión en el lado agua. Rotura catastrófica de tubos y salida de agua al exterior. Ver consecuencia en "6.1.1".	SV-N para alivio de presión.	Introducir by-pass entre la línea de entrada y la de salida de agua de refrigeración.	7	0,6	0,6	2,52	Baja

Aumento de la capacidad de condensación de propileno

PG	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Acciones	C	E	P	R	Prioridad
Menos	Menos presión lado Agua.	7.1. Fallo de suministro.	71.. Ver consecuencia en "3.1".		Hacer estudio sobre la demanda total de agua de refrigeración, y si el colector puede realizar el suministro con el caudal y presiones deseadas.	1,7	0,3	1,2	0,6	Muy Baja
Más	Más Temp. en lado Agua.	8.1. Fuego externo.	8.1. Ver consecuencias en "6.1.1".	SV-N para alivio de presión.		7	0,6	1,2	5,04	Baja
		8.2. Propileno fuera de especificación. T. propileno mayor a la deseada.	8.2.1. Obtención de Agua a mayor temperatura. No consecuencia de seguridad.							
Menos	Menos Temp. en lado Agua.	9.1. Temp. de propileno por debajo de lo deseado.	9.1. Obtención del agua con temperatura más baja a la normal. No consecuencia de seguridad.							
Otra	Otra Composición.	10.1. No aplica.								
As well as	As well as corrosión/erosión	11.1. Erosión en los tubos por choque del fluido.	11.1. Posible pérdida de la integridad estructural del tubo. Posible rotura.	Escoger material adecuado en la construcción. Mantener un correcto mantenimiento del equipo.						
No	No utilities	12.1. No aplica.								

Compañía: DOW Chemical Ibérica S.L.

Proyecto: Unidad de condensación de propileno

Nodo 2: Condensación del propileno. Incluye el suministro de propileno al equipo E-1-N. Condensación/Enfriamiento y salida a proceso.

Intención: Enfriar el corriente de propileno gas hasta condensarlo.

Diagrama: B1-0402-2P

Parámetros: Nivel, Flujo, Presión, Temperatura, Composición, Corrosión/Erosión, Utilities.

PG	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Acciones	C	E	P	R	Prioridad
Más	Más Nivel.	1.1. No aplica.								
Menos	Menos Nivel.	2.1. No aplica.								
No	No Flujo de Propileno.	3.1. Fallo de suministro.	3.1. No consecuencia de seguridad.							
Menos	Menos Flujo de Propileno.	4.1. Fallo de suministro.	4.1. Propileno condensado y enfriado por debajo de los especificado. No consecuencia de seguridad.							
Más	Más Flujo de Propileno.	5.1. Fallo de suministro.	5.1. Temp. de propileno más alta que la especificada. Posible no condensación del corriente. Producto fuera de especificaciones. No consecuencia de seguridad.							
Más	Más Presión en lado Propileno.	6.1. Fuego externo.	6.1.1. Posible afección por radiación térmica. Aumento de presión en el lado propileno. Rotura catastrófica de tubos y carcasa y salida de productos al exterior, o entrada de propileno en el suministro de agua.		Instalar SV para alivio de presión en entrada de propileno.	7	0,6	1,2	5,04	Baja
		6.2. Aumento de caudal de propileno.	6.2.1. Aumento de presión en el lado propileno. Rotura catastrófica de tubos y carcasa y salida de productos al exterior, o entrada de propileno en el suministro de agua.		Instalar SV para alivio de presión en entrada de propileno.	7	1,2	2,5	21	Normal

Aumento de la capacidad de condensación de propileno

PG	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Acciones	C	E	P	R	Prioridad
Menos	Menos presión lado propileno.	7.1. Fallo de suministro.	7.1. Ver consecuencia en "3.1".							
Más	Más Temp. en lado propileno.	8.1. Fuego externo.	8.1. Ver consecuencias en "6.1.1".		Instalar SV para alivio de presión en entrada de propileno.	7	0,6	1,2	5,04	Baja
Menos	Menos Temp. en lado propileno.	9. Temp. de agua de refrigeración por debajo de lo deseado.	9.1. Obtención del propileno con temperatura más baja a la deseada. No consecuencia de seguridad.							
Otra	Otra Composición.	10. No aplica.								
As well as	As well as corrosión/erosión	11. Erosión en los tubos por choque del fluido.	11.1. Posible pérdida de la integridad estructural del tubo. Posible rotura.	Escoger material adecuado en la construcción. Mantener un correcto mantenimiento del equipo.						
No	No utilities	12. No aplica.								

Mediante el estudio HAZOP se ha podido analizar toda la unidad de condensación de propileno, y extraído algunas conclusiones y necesidades a cubrir en el proceso actual. Estas se ven reflejadas en los diagramas del proceso mostrados en el apartado 4.1.

Una de ellas sería el by-pass en las líneas de agua. Esta propuesta consistiría en introducir un transmisor de presión en la entrada de agua, con el cual se podría realizar un lazo de control junto con una válvula en el by-pass propuesto. De esta forma, se podría regular el caudal y con ello las presiones que se den en el intercambiador en una fracción de tiempo pequeña.

## **6 Mantenimiento**

Mediante el estudio realizado a lo largo del proyecto, se han podido observar puntos donde se podría realizar alguna mejora para poder prever la necesidad de mantenimientos y poderlos realizar de forma individual y segura.

Por una parte, se ha observado que no existen puntos de medida de temperatura en ambas entradas y salidas del equipo. Si se introdujera un transmisor de temperatura en ambas entradas y salidas del intercambiador por medio de un sistema de cálculo, se podría obtener una tendencia del coeficiente global de transferencia de calor, y con ello relacionarlo con el fouling que se produce en la unidad. De esta forma, se podrían planear los mantenimientos/limpiezas de cada uno de los equipos.

Enlazado con el mantenimiento de cada unidad, se plantea la introducción de una purga en la salida de propileno, con tal de favorecer la posibilidad de realizar inertizados y vaporizados del lado carcasa sin comprometer el proceso. De esta forma se podrían entregar de forma individual todas las unidades. Esto también favorecería la posibilidad de aislar un equipo en caso de verse comprometido estructuralmente, es decir, que sufra alguna rotura que perjudique el proceso de producción.

## 7 Conclusiones

Se ha realizado el modelo de cálculo para el intercambiador dando resultados satisfactorios. Se ha podido comprobar que el dimensionamiento de los actuales intercambiadores de calor para la condensación de propileno es adecuado para las condiciones facilitadas por la empresa. Además, se ha comprobado que los picos que se pudieran dar en marcha normal, de caudal y de temperatura, no afectarían negativamente a su correcto funcionamiento, cumpliendo de igual forma la condensación del propileno.

Se han dimensionado las tuberías que conexionan el proceso con el intercambiador, con el fin de conocer el espesor necesario para que fluya correctamente el producto sin problemas de posibles grietas en la pared. También se ha observado la necesidad de la aplicación de un aislante en el lado propileno y en la línea de entrada, y también se propone un aislante comercial con el espesor necesario.

Se propone la instalación de un by-pass entre las líneas de entrada y salida de agua de refrigeración por si se produjeran aumentos de caudal y presión en el colector. De esta forma, se podría regular el caudal de entrada en el intercambiador. También se podrían evitar posibles roturas de tubos y las consecuencias que comportaría dicho suceso.

Además, se plantea la instalación de transmisores de temperatura para poder prever los mantenimientos necesarios.

Por otra parte, se comenta la necesidad de introducir purgas en la salida del intercambiador, lado propileno, para poder realizar los vaporizados y inertizados de cada uno de los equipos de forma individual mientras la planta está en marcha.

Y, por último, se ha dimensionado el soporte adicional necesario para la nueva unidad, cumpliendo todos los criterios y premisas necesarios para que no se produzca ningún tipo de rotura ni plastificación del material de los soportes ni de la unidad.

## 8 Bibliografía

- [1] Servicio meteorológico de Cataluña. Disponible: <https://www.meteo.cat/>.
- [2] Ministerio de la Presidencia, BOE, Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Disponible: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>.
- [3] Empresa ROCKWOOL. Disponible: <https://www.rockwool.es/productos-y-soluciones/climatizacion/manta-129/?selectedCat=fichas%20t%C3%A9cnicas>.
- [4] Empresa ROCKWOOL. Disponible: [https://cdn01.rockwool.es/siteassets/rw-es/herramientas/fichas-tecnicas/climatizacion/ft\\_manta-129\\_es.pdf?f=20181120090145](https://cdn01.rockwool.es/siteassets/rw-es/herramientas/fichas-tecnicas/climatizacion/ft_manta-129_es.pdf?f=20181120090145).
- [5] INCROPERA, Frank P., DEWITT, David P., BERGMAN, Theodore L., LAVINE, Adrienne S. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". 6ª edición. Jefferson City: Wiley, 2006. ISBN: 9780471457282. Pág. 514.
- [6] YUNUS A. ÇENGEL, AFSHIN J. GHAJAR, "Transferencia de calor y masa". 4ª edición. Pág. 609.
- [7] INCROPERA, Frank P., DEWITT, David P., BERGMAN, Theodore L., LAVINE, Adrienne S. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". 6ª edición. Jefferson City: Wiley, 2006. ISBN: 9780471457282. Pág. 440.
- [8] THULUKKANAM, Kuppan. Heat Exchanger Design Handbook. 2nd. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013. ISBN: 9781439842133, Pág. 306.
- [9] Características mecánicas del Acero. Disponible: <https://ingemecanica.com/>.
- [10] Perfiles estructurales de los distintos perfiles de Viga. Disponible: <http://alsimet.es/es/ferricos/perfiles-estructurales>

# **ANEXOS**

## **Trabajo Fin de Máster**

### **Máster en Ingeniería Industrial**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona**  
**2021**



## A Propiedades de los fluidos

Para obtener las propiedades de los fluidos en cada una de las temperaturas que se dan en el sistema, se extrae un perfil de las distintas variables en base a la temperatura y se obtiene una ecuación en función de la temperatura con la recta de tendencia.

### A.1 Propiedades del propileno

Tabla A.1. Datos obtenidos del programa Aspen HYSYS.

Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Capacidad calorífica (kJ/kg·K)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m·K)
0,00	0,093	2,40	547,75	0,12
2,50	0,090	2,43	544,05	0,12
5,00	0,087	2,46	540,30	0,12
7,50	0,085	2,49	536,49	0,12
10,00	0,082	2,52	532,61	0,12
12,50	0,080	2,55	528,66	0,12
15,00	0,077	2,59	524,63	0,12
17,50	0,075	2,62	520,53	0,11
20,00	0,073	2,66	516,34	0,11
22,50	0,070	2,70	512,05	0,11
25,00	0,068	2,75	507,66	0,11
27,50	0,066	2,79	503,16	0,11
30,00	0,064	2,85	498,53	0,11
32,50	0,062	2,90	493,76	0,10
35,00	0,010	1,85	29,58	0,02
37,50	0,010	1,85	29,10	0,02
40,00	0,010	1,85	28,65	0,02
42,50	0,010	1,85	28,22	0,02
45,00	0,010	1,85	27,80	0,02
47,50	0,010	1,85	27,41	0,02
50,00	0,010	1,85	27,02	0,02
52,50	0,010	1,85	26,66	0,02
55,00	0,010	1,85	26,30	0,02
57,50	0,010	1,86	25,96	0,02
60,00	0,010	1,86	25,63	0,02
62,50	0,010	1,86	25,31	0,02
65,00	0,010	1,87	25,01	0,02
67,50	0,010	1,87	24,71	0,02
70,00	0,011	1,87	24,42	0,02
72,50	0,011	1,88	24,14	0,02
75,00	0,011	1,88	23,87	0,02
77,50	0,011	1,89	23,60	0,02
80,00	0,011	1,89	23,35	0,02
82,50	0,011	1,90	23,10	0,02
85,00	0,011	1,90	22,85	0,02
87,50	0,011	1,91	22,62	0,02
90,00	0,011	1,92	22,39	0,03
92,50	0,011	1,92	22,16	0,03
95,00	0,011	1,93	21,94	0,03

97,50	0,011	1,93	21,73	0,03
100,00	0,011	1,94	21,52	0,03

Como se realiza una condensación, se han separado las rectas de tendencia de líquido y gas para obtener resultados más fiables en cada uno de los estados.

En primer lugar, se muestran las rectas de tendencia en estado Líquido.

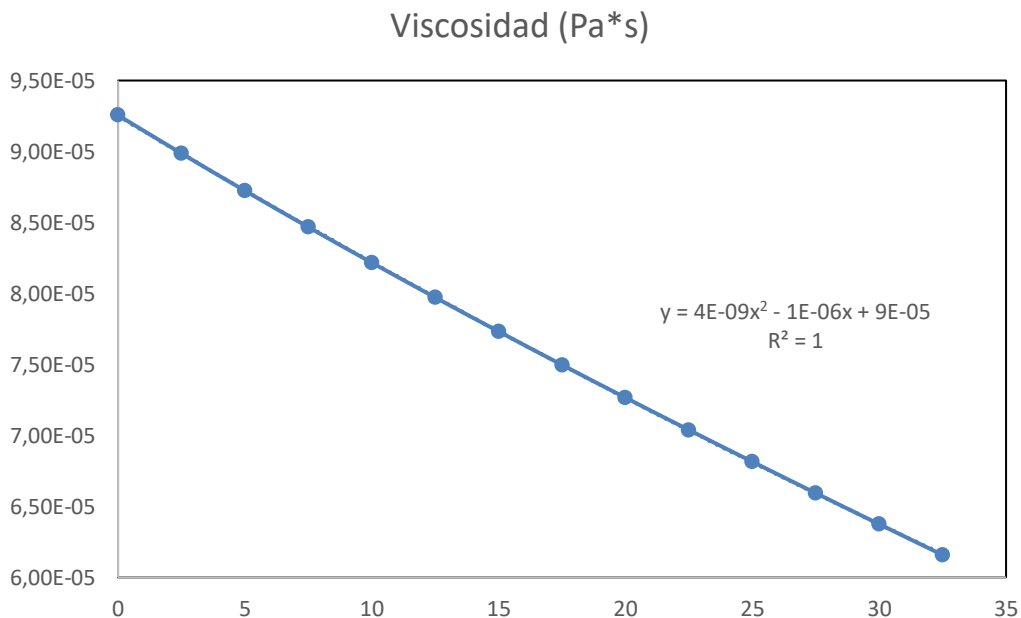


Figura A.1. Recta de tendencia de la viscosidad frente la temperatura del propileno.

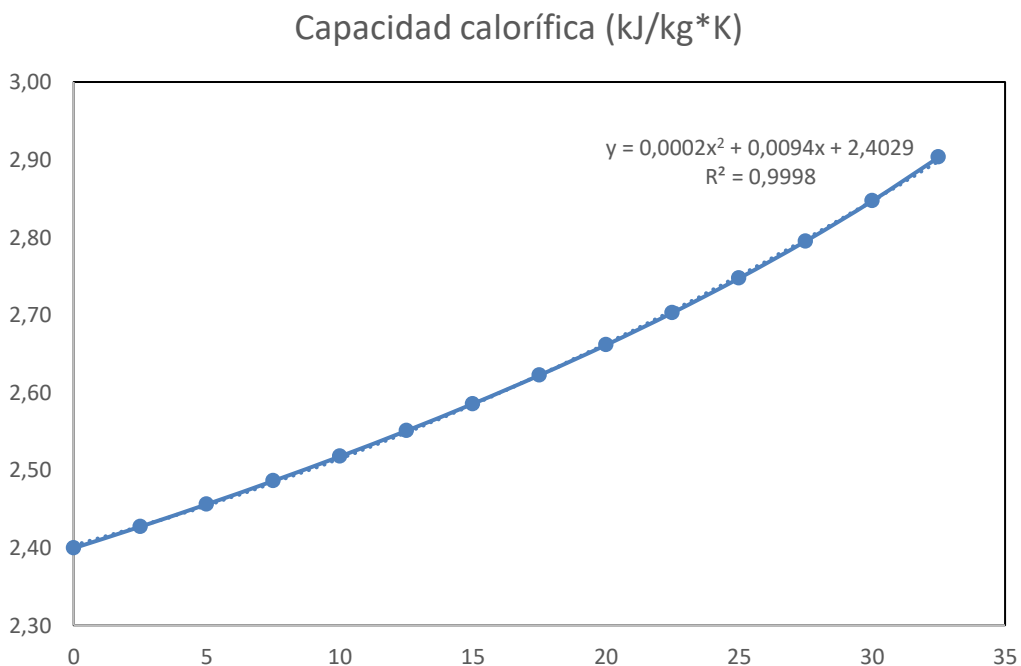


Figura A.2. Recta de tendencia de la capacidad calorífica frente la temperatura del propileno.

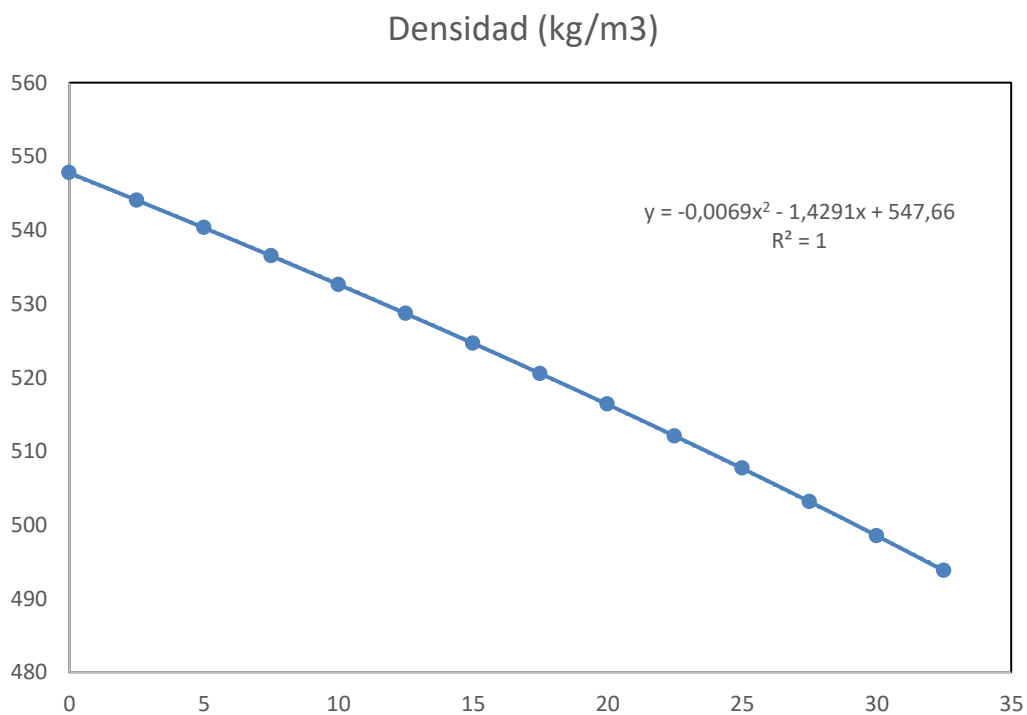


Figura A.3. Recta de tendencia de la densidad frente la temperatura del propileno.

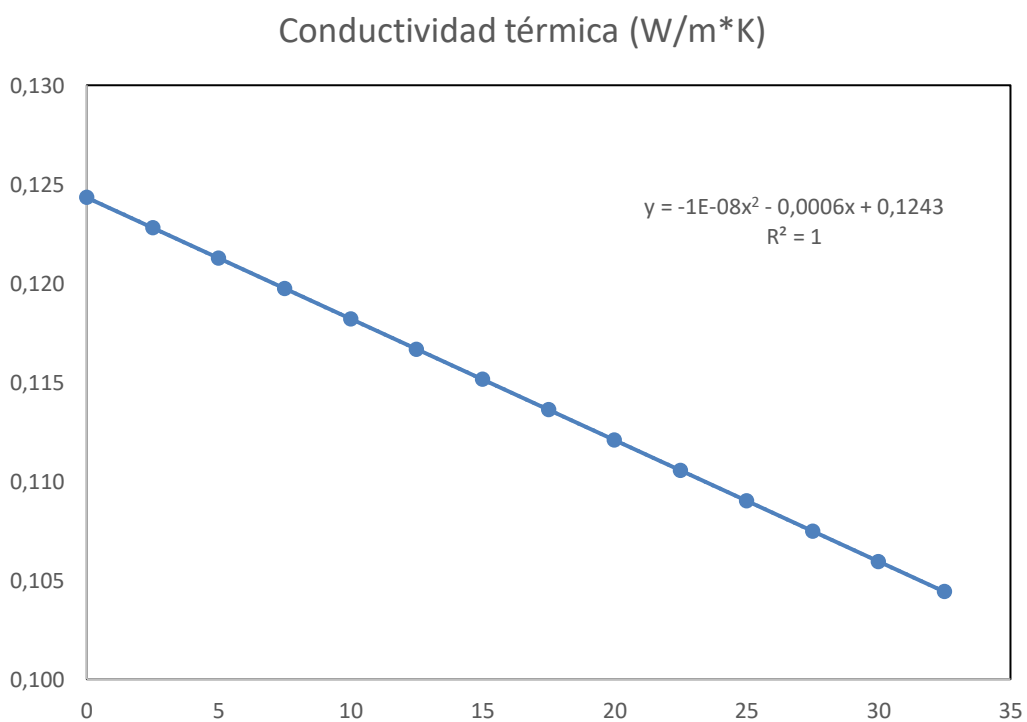


Figura A.4. Recta de tendencia de la conductividad térmica frente la temperatura del propileno.

Y, en segundo lugar, se muestran las rectas de tendencia en estado Gas.

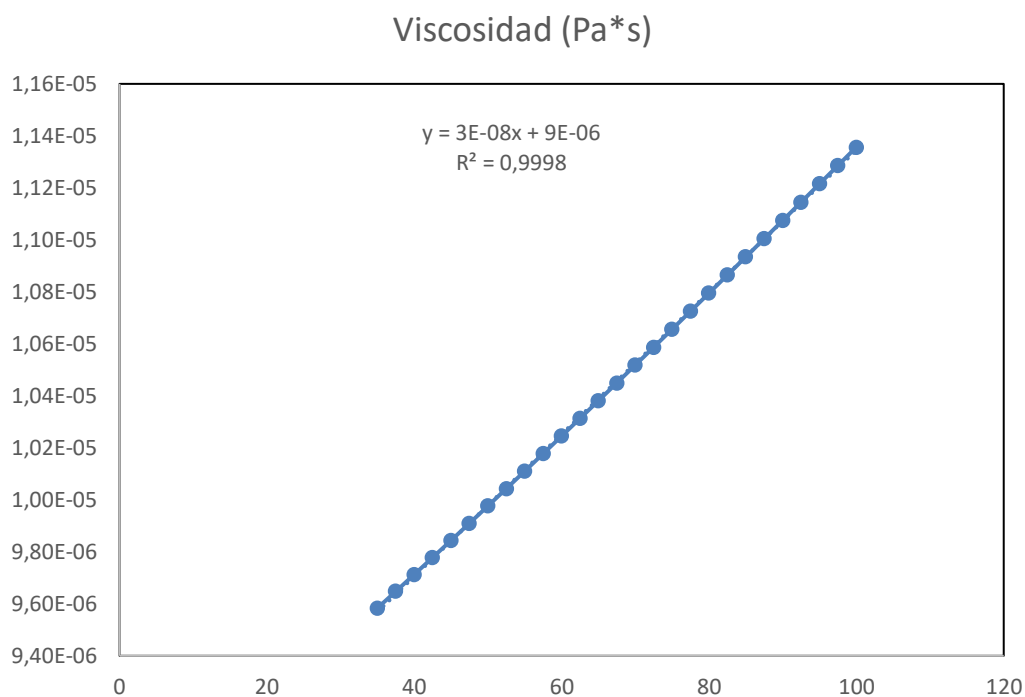


Figura A.5. Recta de tendencia de la viscosidad frente la temperatura del propileno.

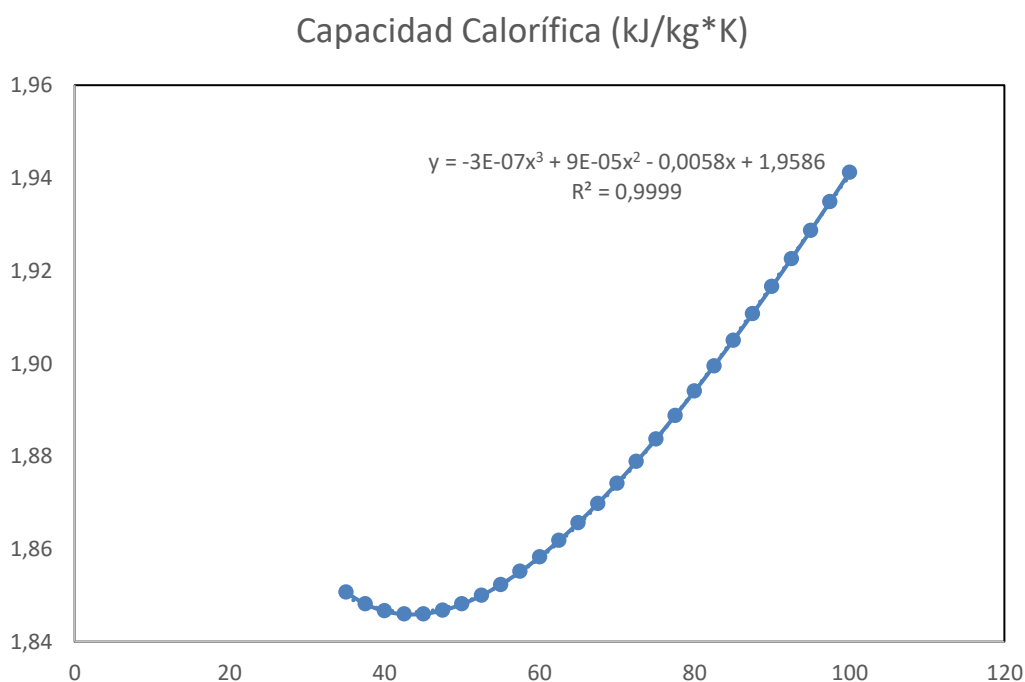


Figura A.6. Recta de tendencia de la capacidad calorífica frente la temperatura del propileno.

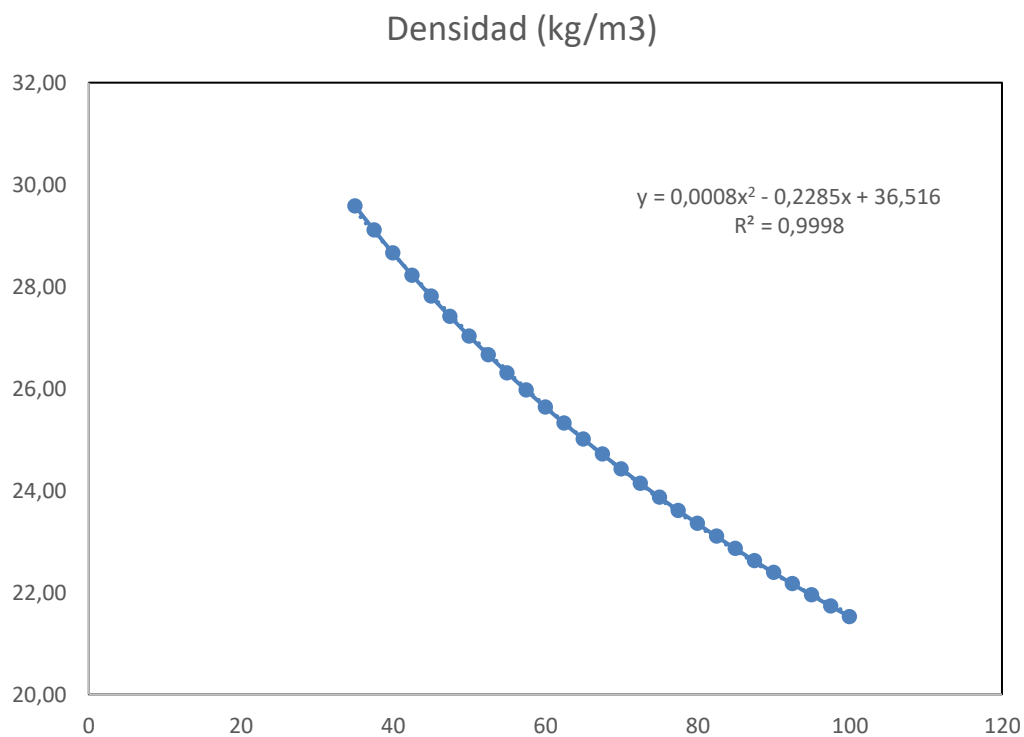


Figura A.7. Recta de tendencia de la densidad frente la temperatura del propileno.

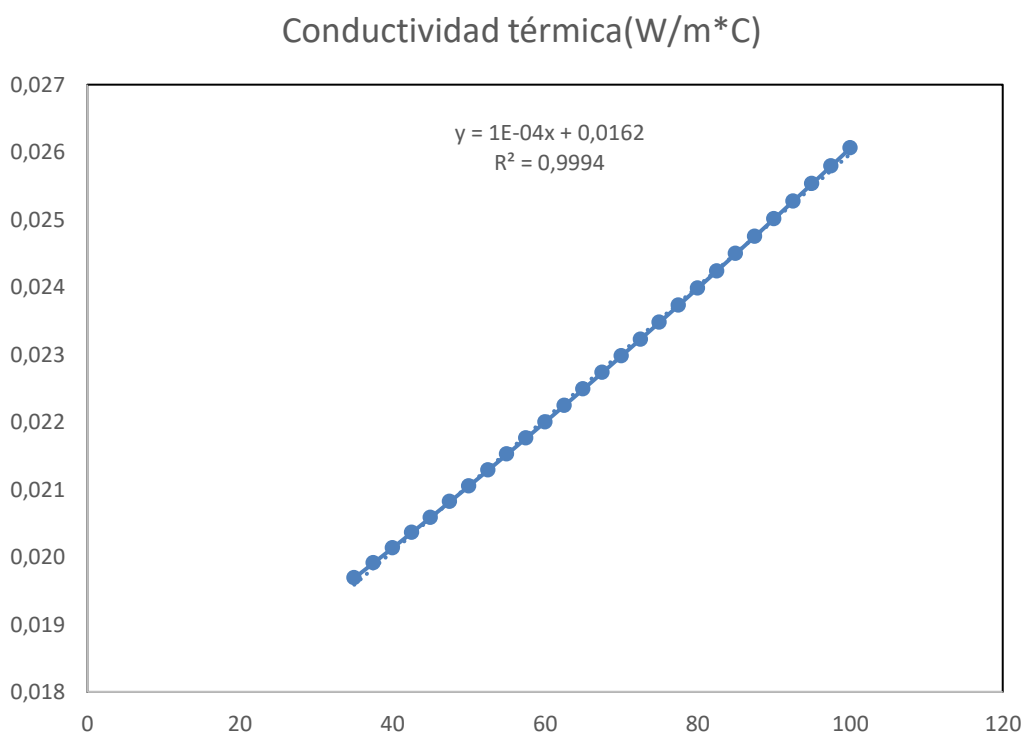


Figura A.8. Recta de tendencia de la conductividad térmica frente la temperatura del propileno.

## A.2 Propiedades del agua de refrigeración

Tabla A.2. Datos obtenidos del programa Aspen HYSYS.

Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Capacidad calorífica (kJ/kg·K)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m·K)
0,00	1,75	4,32	1025,99	0,57
2,50	1,62	4,32	1024,16	0,57
5,00	1,50	4,32	1022,33	0,58
7,50	1,39	4,32	1020,49	0,58
10,00	1,30	4,32	1018,65	0,59
12,50	1,21	4,32	1016,80	0,59
15,00	1,14	4,32	1014,95	0,60
17,50	1,07	4,31	1013,09	0,60
20,00	1,00	4,31	1011,23	0,60
22,50	0,94	4,31	1009,36	0,61
25,00	0,89	4,31	1007,48	0,61
27,50	0,84	4,31	1005,60	0,61
30,00	0,80	4,31	1003,72	0,62
32,50	0,76	4,31	1001,82	0,62
35,00	0,72	4,31	999,93	0,63
37,50	0,68	4,31	998,02	0,63
40,00	0,65	4,32	996,11	0,63
42,50	0,62	4,32	994,20	0,63
45,00	0,59	4,32	992,27	0,64
47,50	0,57	4,32	990,34	0,64
50,00	0,54	4,32	988,41	0,64
52,50	0,52	4,32	986,47	0,65
55,00	0,50	4,32	984,52	0,65
57,50	0,48	4,33	982,56	0,65
60,00	0,46	4,33	980,60	0,65
62,50	0,45	4,33	978,63	0,66
65,00	0,43	4,33	976,65	0,66
67,50	0,41	4,34	974,66	0,66
70,00	0,40	4,34	972,67	0,66
72,50	0,39	4,34	970,67	0,66
75,00	0,37	4,35	968,66	0,67
77,50	0,36	4,35	966,64	0,67
80,00	0,35	4,36	964,62	0,67
82,50	0,34	4,36	962,59	0,67
85,00	0,33	4,36	960,54	0,67
87,50	0,32	4,37	958,49	0,67
90,00	0,31	4,37	956,43	0,68
92,50	0,30	4,38	954,37	0,68
95,00	0,29	4,38	952,29	0,68
97,50	0,29	4,39	950,20	0,68
100,00	0,28	4,40	948,10	0,68

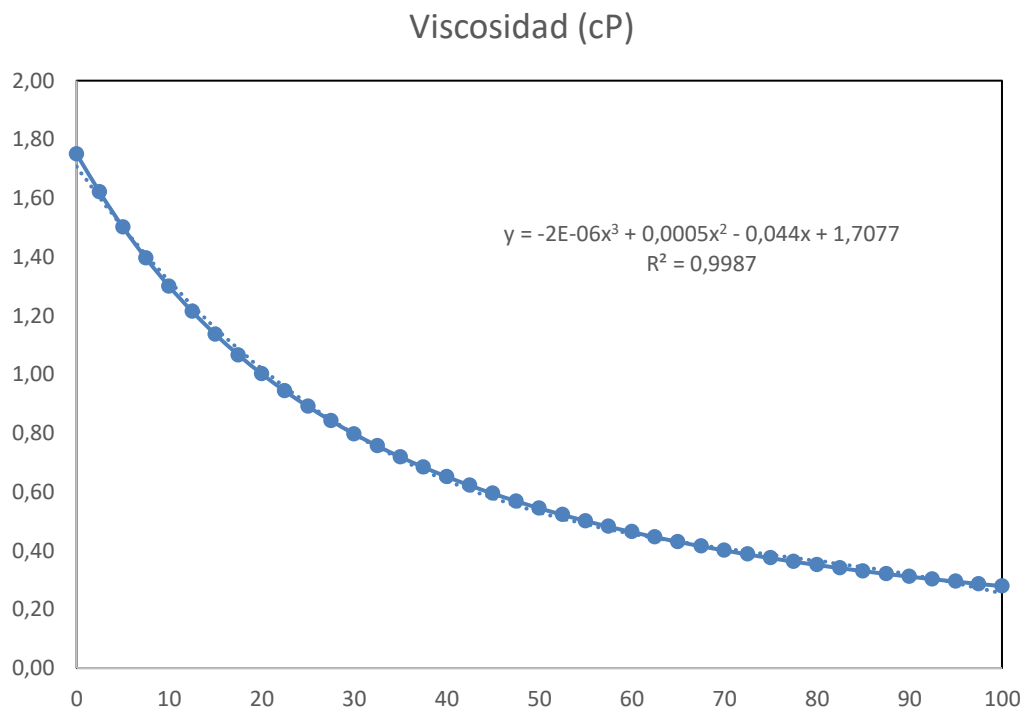


Figura A.9. Recta de tendencia de la viscosidad frente la temperatura del agua de refrigeración.

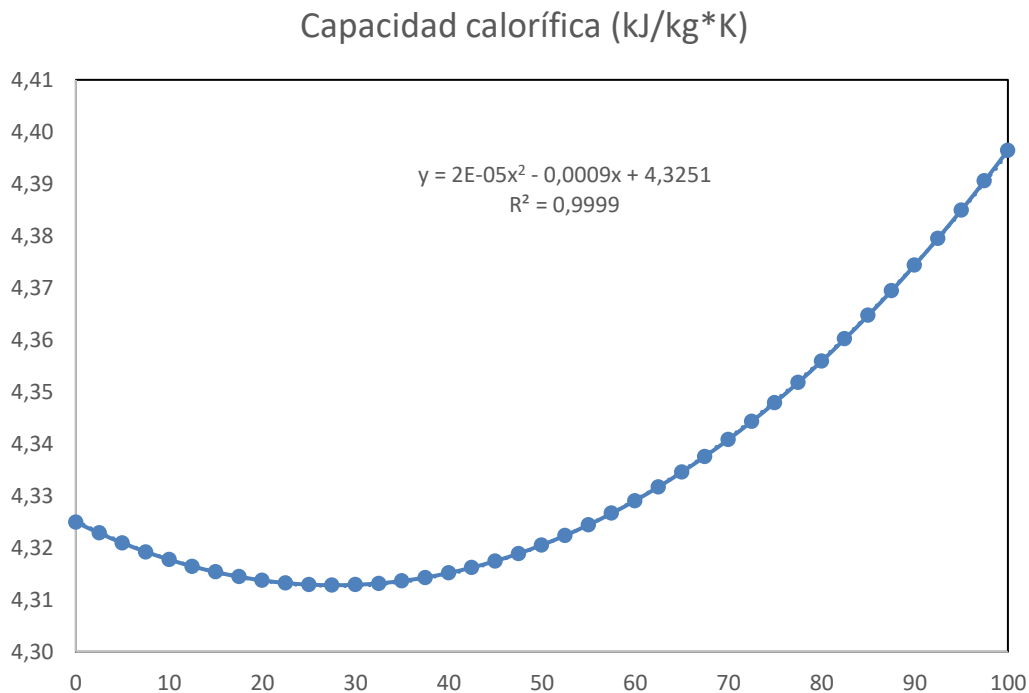


Figura A.10. Recta de tendencia de la capacidad calorífica frente la temperatura del agua de refrigeración.

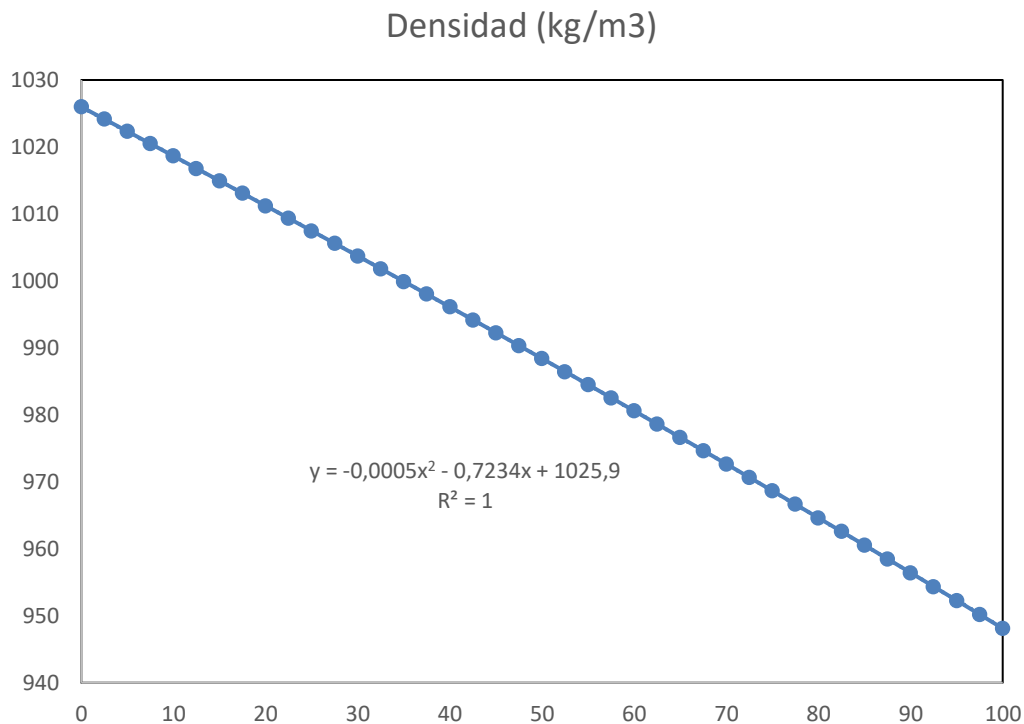


Figura A.11. Recta de tendencia de la densidad frente la temperatura del agua de refrigeración.

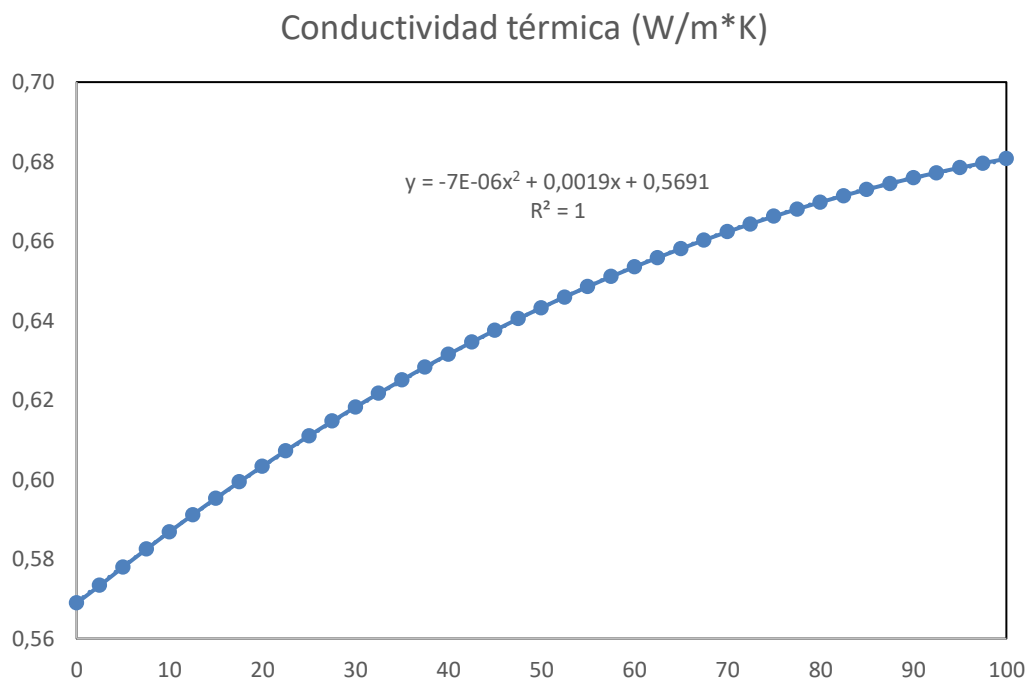


Figura A.12. Recta de tendencia de la conductividad térmica frente la temperatura del agua de refrigeración.

## B Método de cálculo

### B.1 Diseño de las tuberías

El método usado para el diseño de las tuberías se basa en la normativa ASME B31.1. A continuación, se muestra con detalle los pasos realizados en las cuatro tuberías dimensionadas.

Lo primero es definir el objetivo de este diseño, el cual es para definir un espesor de pared con tal de evitar la rotura de la tubería por presiones internas, por erosiones del propio fluido, etc. Una vez obtenido el espesor, deberá ser validado con la velocidad del fluido dentro de la tubería. Es decir, si con el diámetro nominal estipulado previamente la velocidad sobrepasa alguno de los límites, se deberá realizar un cambio del diámetro. Los límites de velocidad para cada uno de los estados se pueden observar en la tabla B.1.1.

Tabla B.1.1. Límite de las velocidades según el estado del fluido.

Fase	Máxima (m/s)	Normal (m/s)	Mínima (m/s)
Gas	40	20	4,5
Líquido	4,5	2,0	1,0

El diseño parte de los diámetros nominales de las tuberías que se están usando actualmente para los otros condensadores.

Tabla B.1.2. Diámetros nominales de las tuberías.

Fluido	DN Entrada (in)	DN Salida (in)
Propileno	10	6
Agua de refrigeración	16	16

Se determina que se utilizará acero al carbono (A-106-B) para la construcción de las líneas. Además, se propone una presión nominal de 150 lb, con la que, mediante la normativa ANSI, se puede encontrar la presión y la temperatura de diseño. Estas últimas serán de 1792,7 kPa bares de presión y de 94 °C.

Conociendo el material, se extrae que la tensión admisible es igual a 103500 kPa.

Con estos datos ya se pueden realizar los cálculos pertinentes.

En primer lugar, se realiza el cálculo del espesor mínimo de pared, que se calcula mediante la ecuación B.1.1.

$$e_{min} = tm = 0,5 \cdot \frac{P \cdot D_o}{(SE + P \cdot y)} \quad (B.1.1)$$

Donde:

- P es la presión de diseño.
- Do es el diámetro exterior.
- SE es la tensión admisible.
- "y" es un coeficiente que depende de la temperatura y el material del sistema. En este caso es igual a 0,4. Se adjunta la figura B.1.1 donde se muestran los valores.

Fuentes: Norma ASME B31.1, pág. 20, TABLE 104.1.2(A) // Perry: Manual del Ingeniero Químico.

Material/%C	482	510	538	566	593	621	649	677	Material
Ac. Ferrítico <sup>1</sup>	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Ac. Austenítico <sup>2</sup>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	A 312 TP 316 L
Otros metales dúctiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	A106 A, A106 B, A335GrP11
Hierro colado	0,4	---	---	---	---	---	---	---	

Figura B.1.1. Coeficientes “y”.

Seguidamente se realiza el cálculo del espesor ordenado. Se obtiene mediante la ecuación B.1.2.

$$e_{min} = e_{min} + c_0 + c_1 + c_2 \tag{B.1.2}$$

Donde:

- c<sub>0</sub> es el margen de corrosión. En este caso igual a 1 mm.
- c<sub>1</sub> es el valor absoluto de la tolerancia del material, en este caso igual a 1 mm.
- c<sub>2</sub> es el margen de adelgazamiento. Dicho factor para este tipo de tuberías es igual a 0 mm.

Una vez obtenido el valor del espesor ordenado, se pasa a su normalización mediante la normativa ANSI. En la figura B.1.2 se observan los espesores normalizados y el tipo de tubería al que pertenecen.

DN (")	DN (mm)	DE (mm)	ANSI Sch 10 Espesor	ANSI Sch 20 Espesor	ANSI Sch 30 Espesor	ANSI Sch 40 Espesor	ANSI Sch 60 Espesor	ANSI Sch 80 Espesor	ANSI Sch 100 Espesor	ANSI Sch 120 Espesor	ANSI Sch 140 Espesor	ANSI Sch 160 Espesor
3/8	10	17,1	-	-	-	2,31	-	3,2	-	-	-	-
1/2	15	21,3	-	-	-	2,77	-	3,73	-	-	-	4,78
3/4	20	26,7	-	-	-	2,87	-	3,91	-	-	-	5,56
1	25	33,4	2,77	-	-	3,38	-	4,55	-	-	-	6,35
1 1/4	32	42,2	2,77	-	-	3,56	-	4,85	-	-	-	6,35
1 1/2	40	48,3	2,77	-	-	3,68	-	5,08	-	-	-	7,14
2	50	60,3	2,77	-	-	3,91	-	5,54	-	-	-	8,74
2 1/2	65	73,0	3,05	-	-	5,16	-	7,01	-	-	-	9,53
3	80	88,9	3,05	-	-	5,49	-	7,62	-	-	-	11,12
4	100	114,3	3,05	-	-	6,02	-	8,56	-	11,13	-	13,49
5	125	141,3	3,4	-	-	6,55	-	9,52	-	12,7	-	15,88
6	150	168,3	3,4	-	-	7,11	-	10,97	-	14,28	-	18,26
8	200	219,1	4,78	6,35	7,04	8,18	10,31	12,7	15,09	18,26	20,62	23,01
10	250	273,0	4,19	6,35	7,8	9,27	12,7	15,09	18,26	21,44	25,4	28,58
12	300	323,8	4,57	6,35	8,38	10,31	14,27	17,48	21,44	25,4	28,58	33,33
14	350	355,6	6,35	7,92	9,52	11,13	15,09	19,05	23,83	27,79	31,75	35,71
16	400	406,4	6,35	7,92	9,52	12,7	16,66	21,44	26,19	30,96	36,53	40,49
20	500	508,0	6,35	9,52	12,7	15,09	20,62	26,19	32,54	38,1	44,45	50,01
24	600	609,6	6,35	9,52	14,27	17,47	24,61	30,96	38,89	46,03	52,37	59,54

Figura B.1.2. Tipos de tuberías y los espesores normalizados según el diámetro nominal escogido.

Finalmente, se calculan las velocidades de los fluidos con el diámetro interno obtenido, que se realiza mediante la ecuación B.1.3.

$$v = \frac{\text{Caudal} \left(\frac{m^3}{s}\right)}{\text{Área}_i} \tag{B.1.3}$$

Donde:

- $\text{Área}_i$  es el área interna del tubo.

Una vez verificadas las dimensiones y las velocidades, se realiza el cálculo de la máxima presión de trabajo admisible, MAWP, y la presión hidráulica. Se calculan mediante las ecuaciones B.1.4 y B.1.5.

$$MAWP = P_{dis} \cdot 1,1 \quad (\text{B.1.4})$$

$$Ph = MAWP \cdot 1,3 \quad (\text{B.1.5})$$

Donde:

- $P_{dis}$  es la presión de diseño.

### B.1.1 Cálculo del aislamiento térmico de las tuberías

Como se establece por normativa, la temperatura en superficies accesibles por un operario no debe superar los 60 °C. De esta forma se previenen posibles accidentes.

En el caso de estudio solo existe una de las 4 tuberías que pueda tener una temperatura mayor a 60 °C, que es la línea de propileno gas que conecta el colector con el intercambiador.

Para realizar el cálculo del aislante necesario para las tuberías, se deben tener en cuenta tanto las condiciones del fluido, que pasa por el interior de la tubería, como las condiciones del material y del aire en el exterior. Las características de cada uno se muestran en las tablas B.1.3 y B.1.4.

Cabe destacar que el caso expuesto es en base al caso más extremo que se pueda dar, donde la superficie pueda tener mayor temperatura. De esta forma, cubriendo el caso más extremo, se cubren todos los posibles.

Tabla B.1.3. Características y datos del material (acero al carbono) necesarios para el cálculo.

Variable	Valor
Conductividad térmica (W/m·K) "k1"	54
*Constante A	5,3
*Constante B	5,5

\*Para el cálculo del coeficiente de transporte externo, lado aire.

Tabla B.1.4. Características de los fluidos, propileno y aire.

Variable	Propileno (Gas)	Aire
Temperatura (°C)	82,3	40
Velocidad (m/s)	12,83	2,78
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	25,3	1,55
Capacidad calorífica (kJ/kg·K)	1,88	1,01
Viscosidad (Pa·s)	1,09E-05	1,96E-05
Conductividad térmica (W/m·K)	2,25E-02	2,69E-02

Para el caso de estudio se utilizará lana de roca como aislamiento. Como el espacio no es un limitante, la lana de roca todo y ocupar más que otros aislamientos industriales, es un material de bajo coste y buenas prestaciones.

Para llevarlo a un caso real, se decide usar lana de roca comercial, específicamente, de la empresa ROCKWOOL. El producto de estudio es la "Manta 129". Las características de este material se exponen en la tabla B.1.5.

Tabla B.1.5. Propiedades de la Manta 129.

Propiedades	Valor	Norma
Densidad nominal (kg/m <sup>3</sup> )	70	EN 1602
Conductividad térmica (W/m·K) "k2"	0,078	EN 12667
Reacción al fuego (Euroclase)	A1 (incombustible)	EN 13501.1
Temperatura máxima (°C)	250	EN 14706

Una vez determinadas las condiciones iniciales, se inicia el proceso de cálculo.

En primer lugar, se realiza el cálculo del calor de intercambio mediante la ecuación B.1.6.

$$Q = kr \cdot (Tf - Ta) \quad (B.1.6)$$

Donde:

- Q es el calor de intercambio.
- Kr es coeficiente global de transferencia, el cual se calcula mediante la ecuación B.1.7.

$$kr = \frac{2 \cdot \pi}{\left(\frac{1}{r_i \cdot h_f} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right)}{k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_2} + \frac{1}{r_2 \cdot h_a}\right)} \quad (B.1.7)$$

- Tf es la temperatura del fluido.
- Ta es la temperatura del aire justo al otro lado de la tubería.
- r (i,1,2) es la distancia entre el centro y la pared interna de la tubería, pared externa de la tubería, y superficie externa del aislante.
- ha es el coeficiente de transporte externo y este valor depende de si es en una tubería vertical o horizontal. Se puede calcular mediante las ecuaciones B.1.8 si es para tubería vertical, y para tuberías horizontales la ecuación B.1.9.

$$ha = B + 0,09 \cdot (Ts - Ta) \quad (B.1.8)$$

$$ha = A + 0,05 \cdot (Ts - Ta) \quad (B.1.9)$$

Una vez determinadas estas variables, se realiza un sistema de ecuaciones mediante la temperatura de superficie. Esta se puede obtener mediante las ecuaciones B.1.10 y B.1.11.

$$Ts = \frac{(Tf - Ta)}{r_2 \cdot h_a \cdot \left(\frac{1}{r_i \cdot h_f} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right)}{k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_2} + \frac{1}{r_2 \cdot h_a}\right)} + Ta \quad (B.1.10)$$

$$Ts = \frac{kr}{2 \cdot \pi \cdot h_a} \cdot (Tf - Ta) + Ta \quad (B.1.11)$$

Definiendo Ts como la máxima temperatura de superficie, 60 °C, se obtienen los valores de los espesores del aislamiento tanto para tuberías en vertical como en horizontal.

Una vez obtenido el espesor mínimo necesario, se busca el espesor comercial en el catálogo. En este caso, 20 mm de la Manta 129.

## B.2 Diseño del intercambiador

Para el diseño del intercambiador, puesto que se produce una condensación en medio del intercambio de calor los cálculos se vuelven un poco más complejos, por lo que se debe realizar una división de equipo en 3 zonas:

- La inicial y la final, donde se realizan diferencias de temperatura en ambos fluidos.
- Y la zona del medio, donde se produce la condensación.

A continuación, se muestran los procesos de cálculo a lo largo de ambos métodos.

### B.2.1 Cálculo de los coeficientes de transferencia y método LMTD.

Lo primero que se debe hacer es definir los datos iniciales o deseados. Seguidamente, se observan las variables necesarias para este cálculo.

- Caudales de ambos fluidos. En los datos proporcionado por la empresa, 64 ton/h de propileno, y 1650 ton/h de agua.
- Temperaturas iniciales de ambos fluidos. En este caso 63,3 °C para el propileno, y 27 °C para el agua de refrigeración.
- Temperatura de saturación del fluido a condensar. En este caso el propileno, y se toma como 36,26 °C.
- Calor latente para definir la segunda zona, la de condensación.

Posteriormente, se puede iniciar los cálculos pertinentes para obtener las condiciones de los compuestos a la salida de la unidad.

En primer lugar, se realiza el cálculo de los coeficientes de transferencia, y, para eso, se deben definir cuáles son los parámetros y/o constantes generales.

A continuación, se muestran las ecuaciones de estas variables.

$$Re = \frac{vmax \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (B.2.1)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (B.2.2)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (B.2.3)$$

Donde:

- Vmax se obtiene mediante la ecuación B.2.4.

$$vmax = \frac{\dot{m}}{\text{Área de paso del fluido}} \quad (B.2.4)$$

- El área de paso para el caso del agua se obtiene mediante el área de la sección transversal del tubo por el número de tubos total en el que se divide el caudal. Se obtiene mediante la ecuación B.2.5.

$$\text{Área de paso del fluido} = \pi \cdot r^2 \quad (B.2.5)$$

- En el caso del propileno se sigue el método Kern para poder obtener el área de paso.

$$\text{Área de paso del fluido} = \frac{DI \cdot c' \cdot B}{Pr} \quad (B.2.6)$$

- DI es el diámetro interno de la carcasa.
- c' equivale a la distancia entre tubo y tubo. En este caso, 6,35 mm.
- B es la distancia entre baffles.

- $P_T$  es la distancia entre el centro de un tubo y el centro de otro. Según documentación facilitada, 25,4 mm.

Posteriormente, se realiza el cálculo de los coeficientes de ambos fluidos en las distintas etapas.

En el caso del agua de refrigeración, se hace uso de la correlación de Dittus & Boelter para obtener el coeficiente de transferencia en las 3 zonas. La correlación se muestra a continuación.

$$Nu = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^{0,4} \quad (B.2.7)$$

A partir de esta correlación y la ecuación B.2.7, se obtienen los coeficientes de transferencia de calor del lado del refrigerante.

Por otra parte, en el caso del propileno, se hace uso de la correlación de Zukauskas en la etapa inicial y final. Esta se muestra en la ecuación B.2.8.

$$Nu = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4} \quad (B.2.8)$$

Donde:

- C y m son igual a una constante para banco de tubos, que para el caso de "C" se obtiene mediante la ecuación B.2.9, y para el caso de "m" es igual a 0,6 en el caso de estudio.

$$C = \left(\frac{S_T}{S_L}\right)^{1/5} \quad (B.2.9)$$

- $S_T$  y  $S_L$  Son las distancias entre el centro de un tubo y el centro de otro tubo. En la figura B.2.1 se muestra un diagrama.

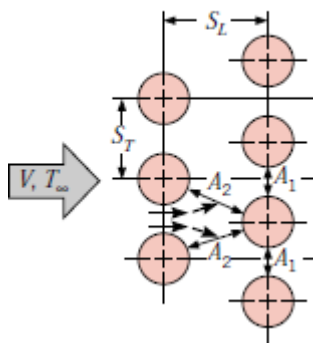


Figura B.2.1. Diagrama de las variables  $S_T$  y  $S_L$ .

Una vez obtenido el valor de Nusselt con la ecuación B.2.7, se aplica la ecuación B.2.3 para obtener el coeficiente de transferencia de las dos zonas donde el propileno tiene una diferencia de temperatura.

Para el caso de la zona donde se produce la condensación, se hace uso de una correlación específica para condensación en banco de tubos horizontales. Esta se muestra en la ecuación B.2.10.

$$h = 0,729 \cdot \left[ \frac{g \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot h_{fg} \cdot k_l^3}{\mu_l \cdot (T_{sat} - T_s) \cdot D} \right]^{1/4} \cdot \frac{1}{N^{1/4}} \quad (B.2.10)$$

Donde:

- $g$  es la aceleración de la gravedad,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .
- Los subíndices  $l$  y  $v$  se refieren al estado de la materia líquido y gas.
- $N$  es el número de hileras de tubos en el intercambiador. En el caso de estudio es igual a 74.

Una vez obtenidos los coeficientes de transferencia de calor de ambos fluidos en cada una de las zonas, se calcula el valor del coeficiente global de transferencia en cada una de las zonas mediante la ecuación B.2.11.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i + D_i} + R''_{f,i} + \frac{D_o \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot k} + R''_{f,o} + \frac{1}{h_o} \quad (\text{B.2.11})$$

Donde:

- $R''_f$  es el coeficiente de fouling de los compuestos.

Posteriormente, se aplica el método LMTD para obtener las áreas utilizadas para cada zona y las temperaturas de salida en los dos fluidos.

El primer paso para el cálculo adecuado de este método es definir el calor de intercambio en cada zona. Como las condiciones del propileno se deben definir como variables fijas en las dos primeras zonas, el calor es posible conocerlo.

En el caso de la zona 1 y la zona 3 se obtiene mediante la ecuación B.2.12.

$$Q = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_i - T_o) \quad (\text{B.2.12})$$

Y en la zona 2, se obtiene mediante el calor latente del propileno. En este caso  $324,14 \text{ kJ/kg}$ .

Una vez obtenido los resultados anteriores, se puede proseguir el proceso para conocer las temperaturas de salida.

Para el caso del propileno se obtiene mediante la ecuación que sigue.

$$T_{out} = T_{in} - \left( \frac{Q \text{ (kW)}}{\dot{m} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot cp \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)} \right) \quad (\text{B.2.13})$$

Para el caso de la refrigeración. Se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$T_{out} = T_{in} + \left( \frac{Q \text{ (kW)}}{\dot{m} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot cp \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)} \right) \quad (\text{B.2.14})$$

En el caso del agua, como existente 2 pasos y 3 zonas, se debe realizar el cálculo del calor cedido en cada una de las 6 etapas como la mitad del calor que se cede en cada una de las 3 zonas, es decir, como ejemplo, en la zona 1 en el paso 1 de agua se absorbe la mitad de calor que cede el propileno en toda la zona 1, dejando así, la otra mitad para el segundo paso de agua que se produzca en dicha zona.

Cabe destacar, que para el próximo cálculo, el del LMTD (ecuación B.2.15), en el caso del agua se realiza la media de las temperaturas de ambos pasos en los límites de zonas, y así, poder realizar los cálculos junto con el perfil de temperaturas del propileno.

A continuación, se define el valor de LMTD junto con la ecuación que se usará para realizar una iteración en zona 3 para la obtención de las temperaturas de salida.

$$LMTD = \frac{(T_{in\text{propileno}} - T_{out\text{agua}}) - (T_{out\text{propileno}} - T_{in\text{agua}})}{\ln \frac{(T_{in\text{propileno}} - T_{out\text{agua}})}{(T_{out\text{propileno}} - T_{in\text{agua}})}} \quad (\text{B.2.15})$$

$$Q = UA \cdot LMTD \quad (B.2.16)$$

Esta última ecuación se definió para la obtención del área de cada una de las zonas. Para conocer el comportamiento de la unidad se fija que el sumatorio de las 3 áreas del intercambiador no puede ser mayor a 1143,8 m<sup>2</sup>, que es el valor del área máxima de transferencia.

Finalmente, se obtienen las temperaturas finales en cada etapa y se completa el perfil de temperaturas a lo largo del intercambiador.

Una vez obtenidos los resultados para el valor nominal, se observará el caudal máximo de propileno que se puede introducir. Esto depende de que se produzca totalmente la condensación en la segunda zona y que la pérdida de carga no sobrepase el límite admisible.

También se observará el comportamiento de la unidad frente a variaciones/picos de caudales y temperaturas en el lado propileno.

### B.2.2 Cálculo de la pérdida de carga

Para el cálculo de la caída de presión en el lado del agua de refrigeración se ha utilizado el proceso de cálculo propuesto por Kuppan. Paso a paso, a continuación, se observan las ecuaciones que se han utilizado.

Para la pérdida de carga en las bocas de entrada y salida (nozzle) se usa la ecuación B.2.17.

$$dP_{nozzle (in-out)} = \frac{1,5 \cdot G_n^2}{2 \cdot g \cdot \rho} \quad (B.2.17)$$

Para la caída de presión en el cambio de paso se utiliza la siguiente ecuación.

$$dP_{Camb. paso} = \frac{4 \cdot N_p \cdot G_t^2}{2 \cdot g \cdot \rho} \quad (B.2.18)$$

Y, por último, la pérdida de carga por fricción en tubos se obtiene mediante la ecuación B.2.19.

$$dP_{fricc. tubos} = f_D \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (B.2.19)$$

Donde:

- $f_D$  se obtiene mediante la ecuación B.2.20.

$$f_D = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (B.2.20)$$

### B.3 Diseño de la suportación adicional del equipo

Para el diseño se ha hecho uso del programa ANSYS.

Para conseguir un diseño correcto y fiable, se ha realizado en dos partes. En primer lugar, las patas de la unidad y posteriormente las vigas que soportaran todo el peso.

A continuación, se muestran, de forma tabulada, los puntos introducidos en el programa para definir las diferentes piezas.

**B.3.1 Simulación de las patas**

Tabla B.3.1. Puntos definidos para la geometría de las patas del intercambiador.

nº Punto	Eje X	Eje Y	Eje Z
1	-0,7150	0,0000	0,0000
2	0,7150	0,0000	0,0000
3	-0,7150	0,7513	0,0000
4	0,7150	0,7513	0,0000
5	0,0000	0,2860	0,0000
6	0,0000	0,7820	0,0920
7	0,0000	0,0000	0,0920
8	0,0000	0,2860	-0,0920
9	0,0000	0,0000	-0,0920
10	0,0000	0,2860	0,0920
11	0,7150	0,0000	0,0920
12	0,7150	0,7513	-0,0920
13	0,7150	0,0000	-0,0920
14	0,7150	0,7513	0,0920
15	-0,7150	0,0000	0,0920
16	-0,7150	0,7513	-0,0920
17	-0,7150	0,0000	-0,0920
18	-0,7150	0,7513	0,0000
19	0,0000	0,0000	0,0920
20	0,0000	0,7820	-0,0920
21	0,0000	0,7820	0,0000
22	0,3575	0,0000	0,0920
23	0,3575	0,0000	-0,0920
24	0,3575	0,0000	0,0000
25	0,3575	0,3725	0,0920
26	0,3575	0,3725	-0,0920
27	0,3575	0,3725	0,0000
28	-0,3575	0,0000	0,0920
29	-0,3575	0,0000	-0,0920
30	-0,3575	0,0000	0,0000
31	-0,3575	0,3725	0,0920
32	-0,3575	0,3725	-0,0920
33	-0,3575	0,3725	0,0000

En el caso de las cargas, se simulan como presiones en el área de contacto con el equipo. El valor de la presión que se simula es igual a 576,12 kPa. Y además, los puntos de apoyo son del tipo empotrado justo en los puntos de contacto con las vigas, ya que se realizan soldaduras para evitar desplazamientos.

### B.3.2 Simulación de las vigas

Tabla B.3.2. Puntos definidos para la geometría de las vigas.

nº Punto	Eje X	Eje Y	Eje Z
1	0,000	0,000	2,200
2	0,000	1,430	2,200
3	0,000	0,000	-2,200
4	0,000	1,430	-2,200
5	0,000	0,000	5,500
6	0,000	1,430	5,500
7	0,000	0,000	-5,500
8	0,000	1,430	-5,500
9	0,000	0,715	2,200
10	0,000	0,715	-2,200
11	0,000	0,715	5,500
12	0,000	0,715	-5,500

En el caso de las cargas, se simulan como fuerzas del mismo valor aplicadas en todos los puntos de apoyo de las patas. La fuerza aplicada en cada uno de los 6 puntos de contacto es igual a 63,8 kN.

## C Seguridad

En el apartado de seguridad se muestra el método HAZOP para poder prever posibles accidentes que se puedan dar en el proceso.

El estudio se divide en dos partes:

- La primera, la cualitativa, se analizan los eventos que puedan surgir.
- La segunda, la cuantitativa, donde se clasifica numéricamente el riesgo que supone dicho evento.

Como se ha mencionado, el estudio se realizará en nodos. A continuación, se muestra el diagrama PFD con los nodos representados.

### C.1 Estudio cualitativo

Este análisis se basa en la siguiente tabla.

Tabla C.1.1. Estudio cualitativo.

PG	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Acciones

Aquí, mediante unas palabras guías y una desviación, se observan los eventos que se puedan dar.

Las palabras guías y las desviaciones se muestran en las tablas C.1.2 y C.1.3.

Tabla C.1.2. Palabras guía.

PG	Significado
No/Sin	Negación de la intención de diseño.
Más	Incremento cuantitativo en un parámetro del proceso.
Menos	Disminución cuantitativa en un parámetro del proceso.
Otro	Sustitución o modificación alternativa en un parámetro del proceso.
As well as / Además	Incremento o modificación cualitativa.

Tabla C.1.3. Desviaciones.

Desviaciones
Nivel
Flujo
Presión
Temperatura
Composición
Corrosión/Erosión
Utilities

## C.2 Estudio cuantitativo

En el método HAZOP mostrado, este estudio se incorpora de la siguiente forma.

Tabla C.2.1. Estudio cuantitativo.

C	E	P	R	Prioridad

Donde:

- "C" son las consecuencias.
- "E" es la exposición al evento.
- "P" es la probabilidad que tiene de producirse el accidente.
- "R" es la magnitud del riesgo, y se obtiene mediante el producto de los valores de los anteriores conceptos.
- "Prioridad" es la prioridad que tiene, o debería tener, el evento en la agenda de la empresa. Este depende de si existen salvaguardas y de la magnitud del riesgo.

Las posibles consecuencias se muestran en la siguiente tabla.

Tabla C.2.2. Consecuencias.

Categoría	Daño a trabajadores	Daño a la propiedad. Costes para remediar el accidente. (€)	Daño medioambiental	Valor
Catástrofe	Se pueden producir más de 10 muertes.	>1000 millones	Daño a grandes extensiones, pérdidas enormes de recursos y servicios ambientales. Daño permanente.	100
Desastroso	El accidente puede ocasionar hasta 9 muertos.	Entre 100 y 1000 millones	Daño a grandes extensiones, pérdidas enormes de recursos y servicios ambientales. Daño permanente.	40
Muy serio	El evento puede provocar lesiones permanentes o incluso la muerte.	Entre 10 y 100 millones	Daño grave. La compañía debe tomar medidas. Gran probabilidad de daños residuales permanentes.	16
Serio	Se produce una baja de hasta 30 días. <10% de probabilidades de que provoque 1 muerte.	Entre 1 y 10 millones	Daño grave que puede afectar al medioambiente y a terceros.	7
Moderado	Se produce una baja de hasta 30 días. <1% de probabilidades de que provoque 1 muerte.	Entre 100 mil y 1 millón	Daño ambiental sin efectos permanentes.	3
Menor	El evento no provoca baja del trabajador.	Entre 5000 y 100000	Daño no relevante con daño ambiental local. Dentro de la propiedad.	1,7

La exposición del posible evento se muestra tabulado a continuación.

Tabla C.2.3. Exposición.

Categoría	Frecuencia del accidente/año	Valor
Muy raro	0,001	0,3
Raro	0,01	0,6
Poco frecuente	0,1	1,2
Ocasional	1	2,5
Habitual	10	5,0
Muy frecuente	100	10

El valor según la probabilidad de que se dé un accidente se observa en la tabla C.2.4.

Tabla C.2.4. Probabilidad.

Categoría	Probabilidad del accidente/año	Valor
Casi imposible	0,00001	0,3
Muy improbable	0,0001	0,6
Podría ser posible	0,001	1,2
Posible	0,01	2,5
Bastante posible	0,1	5,0
Probablemente ocurra	1	10

Una vez obtenidos los valores de las distintas variables mostradas anteriormente, se pasa al análisis del riesgo obtenido. En la tabla C.2.5 se puede ver los rangos.

Tabla C.2.5. Riesgos.

Categoría	Acción que se requiere	Valor
Menor	Evaluar el escenario y las medidas que se puedan aplicar para evitar el evento.	$R \leq 14$
Alto	Se deben tomar medidas correctivas con una prioridad Normal y se deben implementar lo antes posible.	$35 < R \leq 82$
De ámbito urgente	Se deben tomar medidas correctivas para el escenario de riesgo inmediatamente.	$82 < R \leq 350$
Muy extremo	Suspender la actividad y tomar medidas correctivas para el escenario de riesgo.	$R \geq 350$