

# PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE ETILENO

Trabajo final de grado  
Grado en Ingeniería Química



Paula Lafuente Simó  
Joan Ramón Pájaro Crespo  
Anabel Rodríguez Rengel  
Carlos Salgado Espinosa  
Ferriol Viñas Francisco  
Veronica Fernanda Zaldivar Sánchez

Tutor: Marc Perís

Año académico: 2019 - 2020



# CAPÍTULO XI



**Manual de cálculos**



## ÍNDICE

11.1 Diseño del reactor.....	4
11.1.1 Parámetros cinéticos de las reacciones, reactor y catalizador.....	4
11.1.2 Operación y diseño mecánico del reactor.....	6
11.1.2.1 Diseño de la carcasa del reactor.....	12
11.1.2.2 Espesores de carcasa, cabezales, placas tubulares y pantallas deflectoras.....	14
11.1.2.3 Balance de energía.....	18
11.1.2.4 Pérdidas de presión por tubos y carcasa.....	26
11.1.2.5 Aislamiento de los reactores.....	31
11.1.3 Volumen y peso de los reactores.....	32
11.1.3.1 Volumen de los reactores.....	32
11.1.3.2 Peso de los reactores.....	32
11.2 Diseño de las columnas de destilación.....	36
11.2.1 Tipos de columnas y su comparación.....	36
11.2.2 Condensador y reboiler.....	36
11.2.3 Columna de destilación C-400.....	37
11.2.3.1 Diseño en Aspen Hysys.....	37
11.2.3.2 Diseño mecánico.....	41
11.2.3.3 Volumen y peso de la columna.....	46
11.2.3.4 Aislamiento de la columna.....	49
11.2.4 Columna de destilación C-402.....	51
11.2.4.1 Diseño en Aspen Hysys.....	51
11.2.4.2 Diseño mecánico.....	54
11.2.4.3 Volumen y peso de la columna.....	59
11.2.4.4 Aislamiento de la columna.....	62
11.2.5 Columna de destilación C-501.....	64
11.2.5.1 Diseño en Aspen Hysys.....	64
11.2.5.2 Diseño mecánico.....	67
11.2.5.3 Volumen y peso de la columna.....	72
11.2.5.4 Aislamiento de la columna.....	75
11.3 Diseño de las columnas de absorción.....	77
11.3.1 Columna de absorción C-300.....	78
11.3.1.1 Diseño en Aspen Hysys.....	78
11.3.1.2 Diseño mecánico.....	81

11.3.1.3 Volumen y peso de la columna .....	86
11.3.1.4 Aislamiento de la columna .....	89
11.3.2 Columna de absorción C-401 .....	91
11.3.2.1 Diseño en Aspen Hysys .....	91
11.3.2.2 Diseño mecánico .....	94
11.3.2.3 Volumen y peso de la columna .....	99
11.3.2.4 Aislamiento de la columna .....	102
11.3.3 Columna de absorción C-500 .....	104
11.3.3.1 Diseño en Aspen Hysys .....	104
11.3.3.2 Diseño mecánico .....	107
11.3.3.3 Volumen y peso de la columna .....	112
11.3.3.4 Aislamiento de la columna .....	115
11.4 Diseño de los tanques de separación gas-líquido .....	117
11.4.1 Tanque de separación gas-líquido T-300 .....	117
11.4.1.1 Diseño en Aspen Hysys .....	117
11.4.1.2 Diseño mecánico .....	119
11.4.1.3 Volumen y peso del tanque.....	122
11.4.1.4 Aislamiento del tanque.....	125
11.4.2 Tanque de separación gas-líquido T-500 .....	127
11.4.2.1 Diseño en Aspen Hysys .....	127
11.4.2.2 Diseño mecánico .....	129
11.4.2.3 Volumen y peso del tanque.....	132
11.4.2.4 Aislamiento de tanque .....	135
11.5 Diseño de intercambiadores de calor .....	137
11.5.1 Elección de tipo de intercambiadores .....	137
11.5.2 Elección de fluidos transmisores de calor.....	139
11.5.3 Definición del fluido que circula por tubos.....	141
11.5.4 Coeficientes de ensuciamiento (fouling) .....	143
11.5.5 Diseño con Aspen Exchanger Design and Rating V10 .....	145
11.6 Diseño del almacenamiento del óxido de etileno .....	150
11.6.1 Dimensionamiento.....	150
11.6.2 Aislamiento y refrigeración .....	152
11.6.3 Cubetos.....	154
11.7 Diseño del tanque pulmón de etileno .....	155
11.8 Diseño del tanque pulmón de oxígeno .....	157
11.9 Diseño del tanque de almacenamiento de monoetanolamina .....	160

---

11.10 Servicios de planta.....	163
11.10.1 Caldera de vapor.....	163
11.10.1.1 Diseño de la caldera de vapor de agua.....	163
11.10.1.2 Diseño de la caldera de vapor de Dowtherm A.....	164
11.10.1.3 Elección de las calderas de vapor.....	165
11.10.2 Caldera de agua sobrecalentada.....	168
11.10.2.1 Diseño de la caldera de agua sobrecalentada.....	168
11.10.2.2 Elección de la caldera de agua sobrecalentada.....	169
11.10.3 Consumo de combustible.....	170
11.10.4 Torres de refrigeración.....	171
11.10.4.1 Diseño de la torre de refrigeración.....	171
11.10.4.2 Elección de la torre de refrigeración.....	172
11.10.5 Gas natural.....	173
11.10.6 Nitrógeno.....	173
11.10.7 Turbina de vapor.....	174
11.10.7.1 Diseño de la turbina de vapor.....	174
11.10.7.2 Elección de la turbina de vapor.....	176
11.10.8 Chiller.....	177
11.10.8.1 Diseño del Chiller.....	177
11.10.8.2 Elección del Chiller.....	177
11.10.9 Agua del proceso a descalcificar y desmineralizar.....	178
11.10.10 Estación transformadora y grupo eléctrico.....	179
11.11 Diseño de tuberías.....	181
11.11.1 Ejemplo de cálculo de tuberías.....	186
11.11.2 Aislamiento de tuberías.....	187
11.11.2.1 Ejemplo de cálculo de aislante de tuberías.....	189
11.12 Diseño de compresores y expansores.....	190
11.13 Diseño de bombas.....	193
11.13.1 Ejemplo de diseño de bombas.....	198
11.14 Bibliografía.....	203

## 11.1 Diseño del reactor

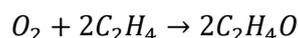
En la planta de producción de óxido de etileno de ETHOXID, se cuenta con tres reactores de iguales dimensiones y condiciones de trabajo. Dos de estos reactores estarán trabajando continuamente, cada uno con la mitad de producción, mientras el tercero estará sin funcionamiento al menos de ser necesario, por ejemplo, en caso de reparaciones o mantenimiento en alguno de los otros reactores.

El diseño de dichos reactores se ha podido realizar en tres etapas distintas. En primer lugar, una primera etapa de cálculos estequiométricos para concretar la cantidad exacta de reactivos necesarios para producir un sobre exceso de óxido de etileno del 20% (en primera instancia), sin tener en cuenta las recirculaciones que habría posteriormente en el proceso y desconociendo las pérdidas del sistema. En segundo lugar, una etapa de búsqueda de información sobre los parámetros de las reacciones (energía de activación, constante de Arrhenius, entre otros.), [15], y sobre el reactor (número, diámetro, longitud de tubos) y el catalizador a usar (porosidad, diámetro y densidad de partícula), [26]. En último lugar, una etapa del diseño mecánico de la carcasa y tubos mediante el programa ASPEN HYSYS Exchanger Design and Rating.

### 11.1.1 Parámetros cinéticos de las reacciones, reactor y catalizador

En primer lugar, se detallarán los parámetros necesarios para el diseño del reactor mediante Aspen Hysys de las diferentes reacciones que tiene el proceso, [15]:

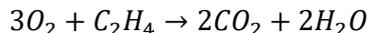
- Reacción principal: formación del óxido de etileno



**Tabla 11.1.** Tabla con los parámetros cinéticos de la reacción principal de formación del óxido de etileno.

Parámetros cinéticos de reacción de formación de $C_2H_4O$	
Tipo de reacción	Heterogénea catalítica
A ( $s^{-1}$ )	$5,28 \cdot 10^4$
E (kJ/kmol)	59832
Calor de reacción a 25°C (kJ/kmol)	$-2,10 \cdot 10^5$

- Reacción secundaria en paralelo: combustión del etileno



**Tabla 11.2.** Tabla con los parámetros cinéticos de la reacción secundaria de oxidación del etileno.

Parámetros cinéticos de reacción de combustión de $C_2H_4$	
Tipo de reacción	Heterogénea catalítica
A ( $s^{-1}$ )	$3,705 \cdot 10^7$
E (kJ/kmol)	89748
Calor de reacción a 25°C (kJ/kmol)	$-4,40 \cdot 10^5$

La conversión del reactor, respecto al oxígeno que es el componente clave y limitante, es del 20%, esto es debido a que hay que limitar la reacción secundaria, ya que es muy exotérmica y supondría un desprendimiento de calor excesivo que haría aumentar la temperatura del reactor.

En segundo lugar, se detallarán algunos de los valores típicos de, por ejemplo, longitud y número de tubos para los reactores de lecho fijo multitubulares para la producción de óxido de etileno y los valores usados en nuestro diseño, [26], presentados en la siguiente tabla.

**Tabla 11.3.** Valores típicos y elegidos de los parámetros para el diseño de los reactores de lecho fijo multitubulares.

Parámetros	Valores generales	Valores utilizados
Número de tubos	5000-25000	5160
Diámetro interno de los tubos (mm)	18-50	32
Longitud de tubos (m)	6-15	6
Diámetro de carcasa del reactor (m)	2,5-7	3,44
Grosor de los tubos (mm)	10-15	2
Porosidad	0,35-0,55	0,5
Temperatura de operación (°C)	220-275	270
Velocidad de tubos ( $m \cdot s^{-1}$ )	1,0-3,0	1,04

Resumiendo, la información obtenida y usada para el diseño del reactor es la siguiente:

- Reactor multitubular de lecho fijo, consta de 5160 tubos de 6 m de longitud, 2 mm de grosor y 32 mm de diámetro interno y con una velocidad de tubos de 1,04 m/s.
- Se necesitará un caudal de agua como refrigerante de 7,98 kg/s.
- El reactor trabaja a una temperatura de 270°C y 20 atmosferas en condiciones óptimas y el 50% del reactor está ocupado por el catalizador de plata usado.

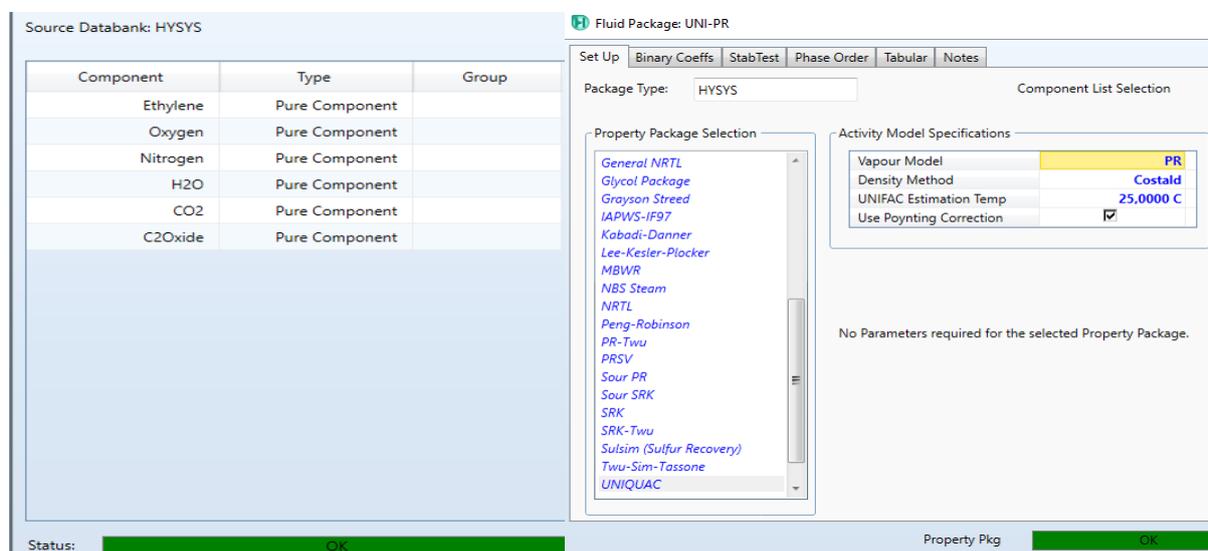
En tercer lugar, se detallarán algunos de los valores típicos de, por ejemplo, porosidad y diámetro de partícula para el catalizador de plata y los valores usados en nuestro diseño, [26], presentados en la siguiente tabla.

**Tabla 11.4.** Parámetros del catalizador de plata escogido para el diseño de los reactores multitubulares.

Parámetros	Valores generales	Valores utilizados
Densidad del catalizador (kg/m <sup>3</sup> )	800 - 2600	1500
Diámetro equivalente de partícula (mm)	2,0 - 5,5	2,0
Forma	Esférico	Esférico
Tipo de catalizador	Plata en soporte de $\gamma$ -alúmina	Plata en soporte de $\gamma$ -alúmina
Porosidad interna	0,47 - 0.63	0,5
Capacidad calorífica (kJ/kg*K)	1	1

### 11.1.2 Operación y diseño mecánico del reactor

Previamente a poder empezar con la operación y diseño de los reactores mediante la herramienta de Aspen Hysys, es necesario definir tanto la lista de componentes a utilizar con su paquete de fluidos en concreto, así como definir las reacciones tanto de formación de óxido de etileno como de combustión de etileno, tal y como muestran las siguientes figuras.



**Figura 11.1.** Lista de componentes y paquete de fluidos usados en Aspen Hysys para el diseño del proceso de la planta.

Como se puede observar en la **Figura 11.1**, una vez definida la lista de componentes que intervendrán en el proceso: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), óxido de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) y agua (H<sub>2</sub>O); se decide cual es el paquete del fluido más adecuado, eligiendo así UNIQUAC combinado con Peng-Robinson (PR) debido a la mezcla tanto de gases como de un posible líquido como el agua.

Una vez determinada la lista de componentes y el paquete del fluido, se prosigue a determinar el tipo y las características que tendrán las reacciones del proceso, especificando así parámetros como la energía de activación o la constante de Arrhenius, tal y como se indica en las siguientes figuras.

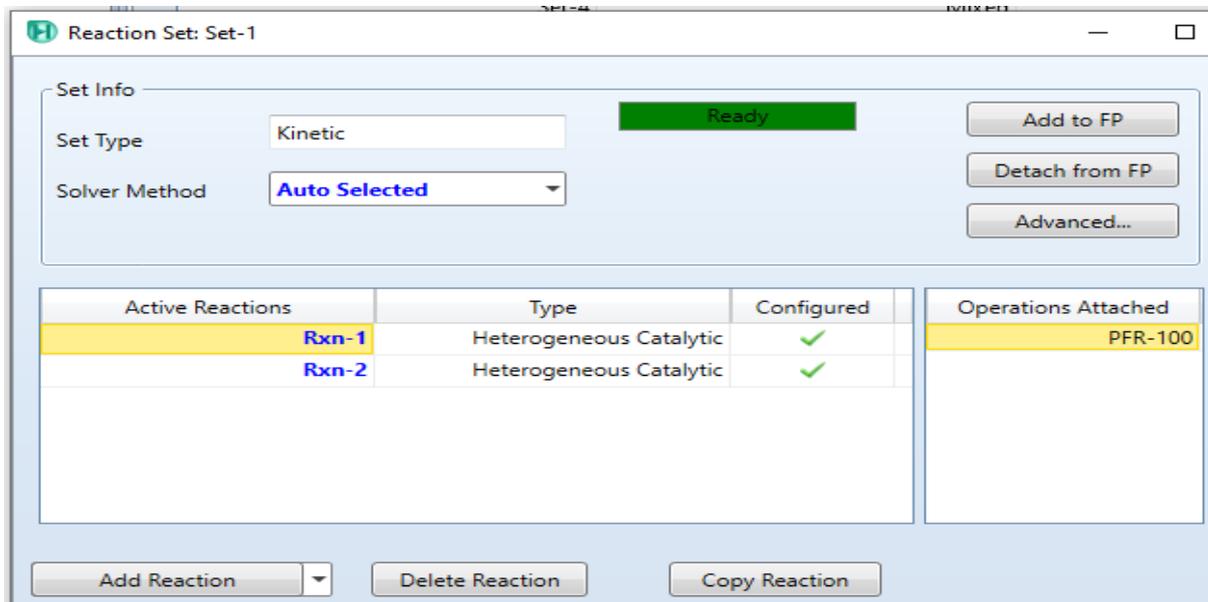


Figura 11.2. Tipo de reacciones que tendrán lugar en los reactores para la producción de óxido de etileno.

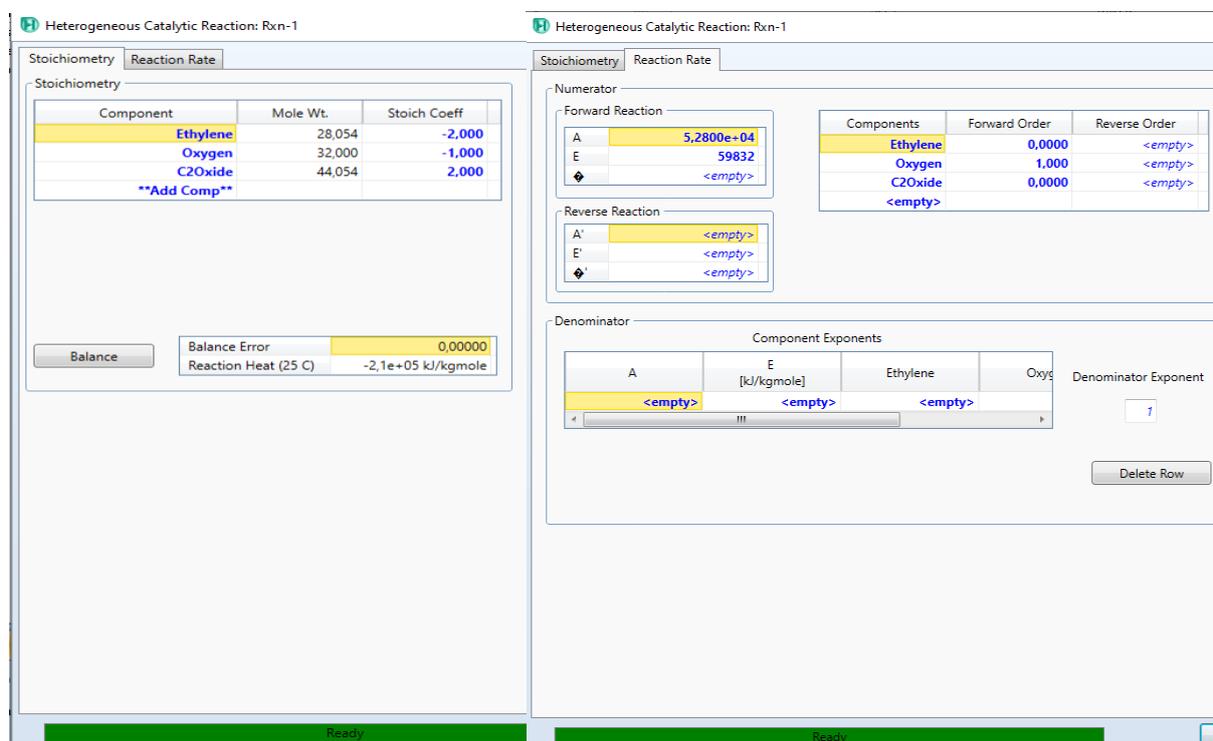


Figura 11.3. Parámetros cinéticos y estequiometría de la reacción principal introducidos en Aspen Hysys.

En primer lugar, y tal y como se observa en la **Figura 11.2**, se crean dos reacciones y se indica de qué tipo se tratan, en este caso, reacciones heterogéneas catalíticas.

Posteriormente, como se puede observar en la **Figura 11.3**, se indican los parámetros necesarios para la reacción de formación de óxido de etileno, indicados en la **Tabla 11.1** del apartado anterior, así como la estequiometría de reacción y el componente clave (oxígeno).

The screenshot shows two panels for 'Heterogeneous Catalytic Reaction: Rxn-2'. The left panel is the 'Stoichiometry' tab, and the right panel is the 'Reaction Rate' tab.

**Stoichiometry Tab (Left Panel):**

Component	Mole Wt.	Stoich Coeff
Oxygen	32,000	-3,000
Ethylene	28,054	-1,000
CO2	44,010	2,000
H2O	18,015	2,000
**Add Comp**		

Balance Error: 0,00000  
Reaction Heat (25 C): -4,4e+05 kJ/kgmole

**Reaction Rate Tab (Right Panel):**

**Numerator:**

Component	Forward Order	Reverse Order
Oxygen	1,000	<empty>
Ethylene	0,0000	<empty>
CO2	0,0000	<empty>
H2O	0,0000	<empty>
<empty>		

**Denominator:**

Component Exponents	Denominator Exponent
A	
E [kJ/kgmole]	
Oxygen	1
Ethyl	

**Figura 11.4.** Parámetros cinéticos y estequiometría de la reacción secundaria introducidos en Aspen Hysys.

Como se puede observar en la **Figura 11.4**, se indican los parámetros necesarios para la reacción de combustión del etileno, indicados en la **Tabla 11.2** del apartado anterior, así como la estequiometría de reacción y el componente clave (oxígeno).

Una vez definidas las diferentes reacciones que tendrán lugar en el reactor y conociendo los caudales de entrada y salida mediante los balances materia hechos, el siguiente paso es el diseño del reactor con los valores típicos de tubos y catalizador comentados en las **Tablas 11.3 y 11.4** del apartado anterior.

The screenshot shows the 'Reactions' tab for 'Plug Flow Reactor: R-200A - Set-1'. The 'Reaction Balance' section is active, showing the following data:

	Act. % Cnv.	Base Comp	Rxn Extent
Rxn-1	20,31	Oxygen	90,56
Rxn-2	18,92	Oxygen	28,12

**Figura 11.5.** Conversión respecto al oxígeno obtenida en el reactor para las dos reacciones del proceso.

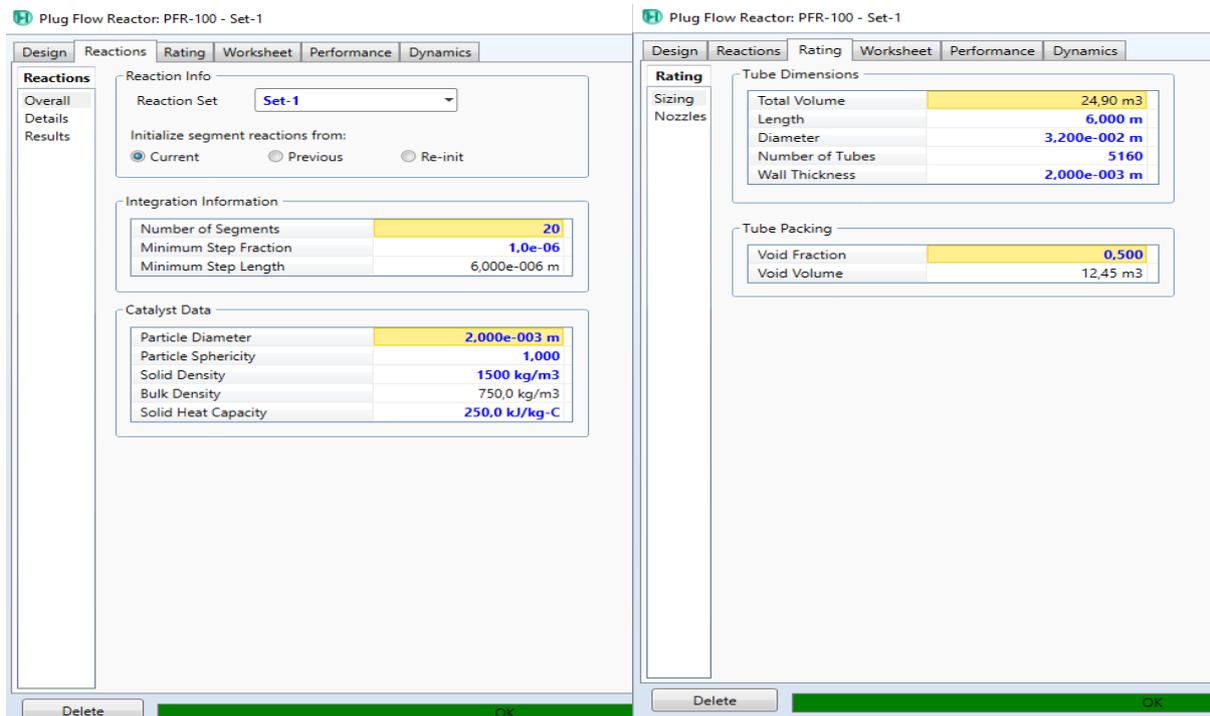


Figura 11.6. Parámetros mecánicos de los rectores para su diseño y obtención del volumen necesario.

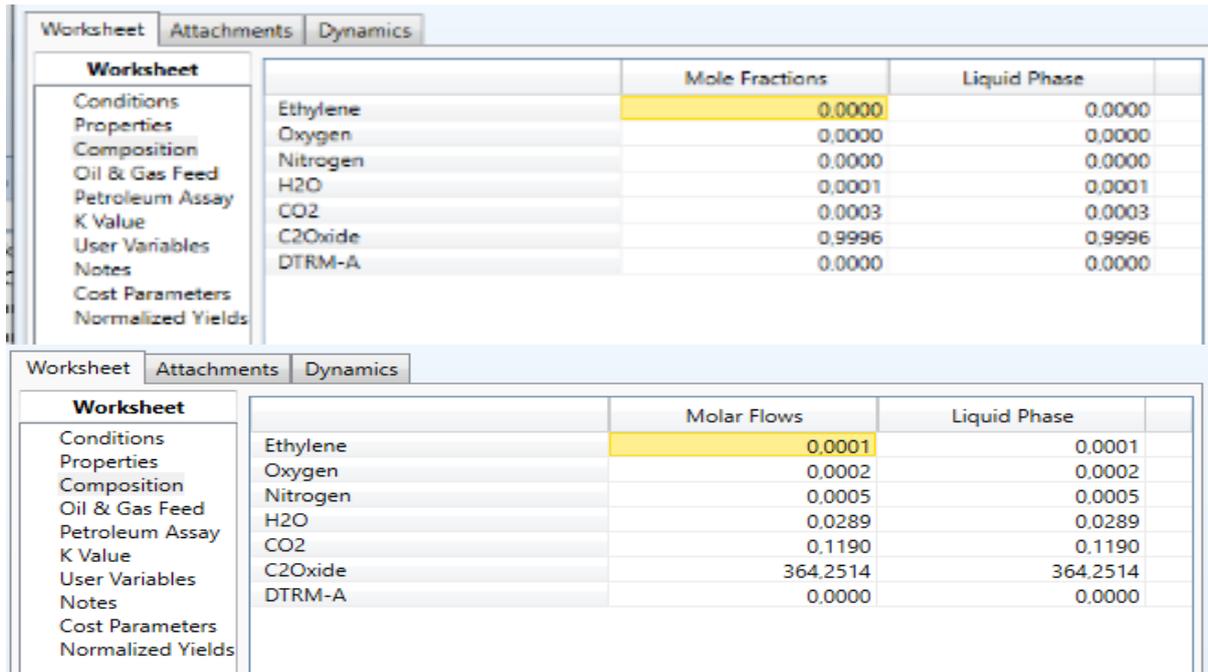
Tal y como se puede observar en las **Figuras 11.5 y 11.6**, marcando la temperatura y presión que queremos en la entrada (270°C y 2000 kPa) y salida del reactor (270°C y 1870 kPa) e introduciendo las características del catalizador y del reactor de las **Tablas 11.3 y 11.4**, con un grado de libertad, se ha obtenido una conversión del 20,31% y un volumen de reactor, sin tener en cuenta la carcasa, es decir, únicamente teniendo en cuenta los tubos y el volumen del catalizador, de 24,90 m<sup>3</sup>.

A continuación, y sabiendo que el porcentaje molar en la salida del reactor del óxido de etileno teórico no puede ser mayor al 3%, se puede comprobar en la **Figura 11.7** que se ha obtenido un valor de 2,69% al final, cumpliendo con lo citado anteriormente.

Worksheet		Mole Fractions		Vapour Phase	Liquid
Conditions	Ethylene	0.1935	0.1935	0.1935	
Properties	Oxygen	0.0400	0.0400	0.0400	
Composition	Nitrogen	0.6951	0.6951	0.6951	
Oil & Gas Feed	H2O	0.0113	0.0113	0.0113	
Petroleum Assay	CO2	0.0332	0.0332	0.0332	
K Value	C2Oxide	0.0269	0.0269	0.0269	
User Variables					
Notes					
Cost Parameters					
Normalized Yields					

Figura 11.7. Composición molar del corriente de salida de los reactores.

Por último, es necesario especificar que inicialmente se había sobredimensionado en un 20% la cantidad de reactivos por posibles pérdidas que al final del proceso se ha demostrado son prácticamente nulas, obteniendo así una pureza del 99,96% molar tal y como se puede observar en la **Figura 11.8**, por lo que, al final, la producción final ha sido de 123.264 t/año y, por tanto, sabiendo que el sistema estaba pensado para producir 120.000 t/año, existe un 2,65% de sobredimensionamiento.



Worksheet		Mole Fractions	Liquid Phase
Ethylene		0.0000	0.0000
Oxygen		0.0000	0.0000
Nitrogen		0.0000	0.0000
H2O		0.0001	0.0001
CO2		0.0003	0.0003
C2Oxide		0.9996	0.9996
DTRM-A		0.0000	0.0000

Worksheet		Molar Flows	Liquid Phase
Ethylene		0.0001	0.0001
Oxygen		0.0002	0.0002
Nitrogen		0.0005	0.0005
H2O		0.0289	0.0289
CO2		0.1190	0.1190
C2Oxide		364.2514	364.2514
DTRM-A		0.0000	0.0000

**Figura 11.8.** Caudales y composiciones molares del corriente de salida del proceso con una producción de óxido de etileno final de 123.181 toneladas al año.

A continuación, se detallarán algunos cálculos sobre variables que no se han especificado anteriormente y que serán necesarias para el cálculo de la carcasa del reactor, así mismo, se realizará la comprobación de que realmente el volumen del reactor es el indicado por la herramienta de Hysys.

En primer lugar, se ha realizado la comprobación del volumen del reactor de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.1} \quad V_{reactor} = N_{tub} \cdot L_{tub} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int})^2 = 5160 \cdot 6 \text{ m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (32 \cdot 10^{-3})^2 \approx 24,90 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{reactor}$  = volumen del reactor ( $\text{m}^3$ )

$N_{tub}$  = número de tubos

$L_{tub}$  = longitud o altura de tubos (m)

$D_{int}$  = diámetro interno/nominal de los tubos (m)

En segundo lugar, se determina el tiempo de contacto entre los reactivos y el catalizador (tiempo de residencia) de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.2 } \tau = \frac{V_{cat,p} - V_{cat,np}}{Q} = \frac{24,90 \text{ m}^3 - (24,90 \cdot (1-0,5)) \text{ m}^3}{196669,88 \text{ kg/h} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{12,64 \text{ kg}}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 2,88 \text{ s}$$

Dónde:

$Q$  = caudal volumétrico de entrada al reactor ( $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ )

$V_{cat,p}$  = volumen del catalizador con porosidad ( $\text{m}^3$ )

$V_{cat,np}$  = volumen del catalizador sin porosidad ( $\text{m}^3$ )

$\tau$  = tiempo de residencia del reactor (h)

Así mismo, la velocidad de tubos ha sido calculada de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 11.3 } v_{tub} = \frac{m_t}{\rho_t \cdot A_{pas \ 1 \ tub} \cdot N_t} = \frac{196669,88 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{12,64 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (32 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5160} = 1,04 \text{ m/s}$$

Dónde:

$L_{tub}$  = Longitud o altura de los tubos (m)

$v_{tub}$  = velocidad de tubos ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )

Aunque las velocidades típicas para gases suelen estar entre un rango de 10-30 m/s, esto solo se puede aplicar para presiones de trabajo atmosféricas, pero, por ejemplo, en el presente caso se trabaja a 20 atmosferas, por tanto, el rango de velocidades pasa a ser de 1-10 m/s y, por lo tanto, podemos considerar como correcto el cálculo realizado.

Así mismo, otro valor que se puede determinar es el volumen de tubos y, posteriormente, el caudal volumétrico de estos de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.4 } V_{tub} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int})^2 \cdot L_{tub} = \frac{\pi}{4} \cdot (32 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot 6 \text{ m} = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Ecuación 11.5 } Q_{tub} = \frac{V_{tub}}{\tau} = \frac{4,82 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{8,17 \cdot 10^{-4} \text{ h}} = 5,91 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dónde:

$D_{int}$  = diámetro interno de los tubos (m)

$V_{tub}$  = volumen de cada tubo ( $\text{m}^3$ )

$Q_{tub}$  = caudal volumétrico por cada tubo ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

A continuación, se necesita encontrar un último dato que el programa Aspen Hysys no proporciona explícitamente. Se trata de la cantidad exacta de catalizador a usar y viene definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 11.6 } W = V \cdot \rho_b = V \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_c$$

$$W = 24,90 \cdot 750 = 24,90 \cdot (1 - 0,50) \cdot 1500 = 18675 \text{ kg de catalizador}$$

Dónde:

$W$  = peso de catalizador a usar

$V$  = volumen del reactor sin carcasa

$\rho_b$  = bulk density o densidad del lecho

$\rho_c$  = densidad del catalizador sólido

$\epsilon$  = porosidad del catalizador

#### 11.1.2.1 Diseño de la carcasa del reactor

Para poder calcular el diámetro de la carcasa del reactor hace falta sumarle el diámetro de haz de tubos ( $D_b$ ) o el que es lo mismo, el *Bundle diameter*. Este es el espacio que debe existir entre el haz de tubos y la pared externa de la carcasa, que a la misma vez dependerá del tipo de carcasa que se use. En este caso se usa la carcasa tipo T y algunos otros tipos de estas están indicadas en la siguiente tabla:

**Tabla 11.5.** Tipos de cabezales de carcasa según el método de Kern para diseño de intercambiadores de calor.

<i>Fixed and U-tube</i>	Tipos U/L/M/N
<i>Outside packed head</i>	Tipos P
<i>Split – ring floating head</i>	Tipos S/W
<i>Pull-through floating head</i>	Tipos T

Este tipo de cabezal de la carcasa es la que proporciona mayor espacio entre la carcasa y el cabezal de tubos y una de las ventajas principales es que no está fijada y es por eso por lo que da muchas facilidades a su mantenimiento y limpieza.

A continuación, se calcula el diámetro de haz de tubos de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.7 } D_b = D_{ext,tub} \cdot \left(\frac{N_{tub}}{K_1}\right)^{\frac{1}{n_1}} = 0,036 \text{ m} \cdot \left(\frac{5160}{0,319}\right)^{\frac{1}{2,142}} = 3,32 \text{ m}$$

Dónde:

$D_b$  = diámetro de haz de tubos (m)

$D_{ext,tub}$  = diámetro externo de tubos (m)

$N_{tub}$  = número de tubos

$K_1$  y  $n_1$

= constantes que vienen determinadas según el pitch elegido y el número de pasos por tubos.

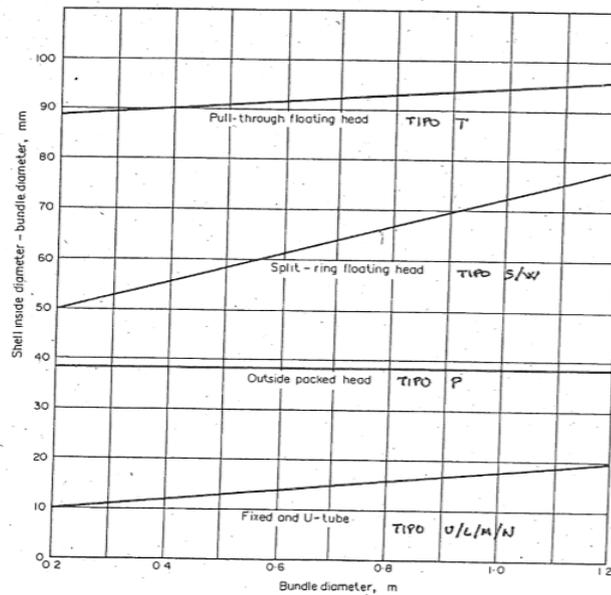
Se tiene un paso por tubos y las constantes son definidas por los valores de la siguiente **tabla 11.6**:

**Tabla 11.6.** Valores de las constantes  $K_1$  y  $n_1$  según el pitch y los pasos por tubos elegidos para el diseño.

Pitch triangular $p_t = 1.25 D_E$					
Passos per tub	1	2	4	6	8
$K_1$	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
$n_1$	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Pitch quadrat $p_t = 1.25 D_E$					
Passos per tub	1	2	4	6	8
$K_1$	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
$n_1$	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

Una vez calculado el valor del diámetro de haz de tubos, sabiendo que se usa una carcasa de tipo T y mediante la **figura siguiente 11.9**, se obtiene el valor de la diferencia entre diámetro de carcasa y diámetro de haz de tubos ( $D_c - D_b$ ) y, posteriormente, se podrá obtener el diámetro de carcasa.

Tal y como se puede observar en la **Figura 11.9**, el valor del diámetro de haz de tubos no se encuentra dentro del rango, por lo que se ha obtenido la ecuación de la recta y se han obtenido los valores mediante esta.



**Figura 11.9.** Relación  $D_c - D_b$  según el valor de  $D_b$  (m).

**Ecuación 11.8**  $D_c - D_b \sim 113,94 \text{ mm}$

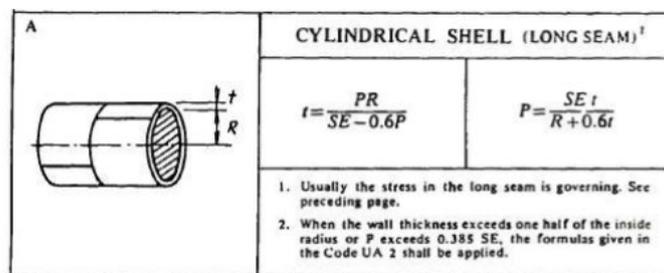
$$D_c = 113,94 \text{ mm} + D_b = 113,94 + 3320 = 3433,94 \text{ mm} = 3,434 \text{ m}$$

Por lo tanto, se determina que el diámetro interno de la carcasa es de 3,44 m.

11.1.2.2 Espesores de carcasa, cabezales, placas tubulares y pantallas deflectoras

Espesor de la carcasa

Para el cálculo de los espesores tanto de la carcasa como de los cabezales/fondos también se usarán las fórmulas del código A.S.M.E para equipos tubulares a presión según la siguiente **figura 11.10**, [13] y [24]:



**Figura 11.10.** Fórmulas para el cálculo del espesor de la carcasa.

**Ecuación 11.9**  $t_{min,c} = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_c} + C_1 = \frac{6,92 \text{ atm} \cdot 1720 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 6,92 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 14,67 \text{ mm}$

Dónde:

$t_{min,c}$  = grosor mínimo de la carcasa (mm)

$P_c$  = presión de operación en la carcasa (atm)

$S$  = Esfuerzo del material (atm)

$E$  = factor de eficacia de soldadura (normalmente para este material se usa 0,85)

$R_{int,c}$  = radio interno de la carcasa (mm)

$C_1$  = constante de resistencia a la corrosión (suele ser de 0,1 mm/año)

Cabe especificar que se seguirá considerando la planta de ETHOXID será hábil durante 15 años, por lo que la constante de resistencia a la corrosión será de 1,5mm. Así mismo, el valor del esfuerzo del material (en este caso acero 316L) se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 11.7.** Valores de los esfuerzos materiales según el acero escogido (316L) y la temperatura de diseño (270°C).

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL														
(CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)														
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	—	—	—
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	—	—

Tal y como se puede observar, y considerando la temperatura de diseño del refrigerante unos 165°C o 329°F, según la **tabla 11.7** corresponde a un valor de  $S \sim 15,7 \text{ ksi}$ , o lo que vienen a ser unas 1068,32 atm.

Por tanto, y teniendo en cuenta que el espesor mínimo encontrado es de unos 14,67 mm, este se sobredimensionará a 15 mm para evitar posibles problemas. Por esta razón, el diámetro externo de la carcasa será el siguiente:

$$\text{Ecuación 11.10 } D_{ext,c} = D_{int,c} + 2 \cdot t_{min,c} = 3440 \text{ mm} + 2 \cdot 15 \text{ mm} = 3490 \text{ mm} = 3,47 \text{ m}$$

Dónde:

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la carcasa (mm)

$D_{int,c}$  = diámetro interno de la carcasa (mm)

$t_{min,c}$  = espesor mínimo de la carcasa (mm)

Espesor de los cabezales

A continuación, se procederá al cálculo del espesor de los cabezales o fondos, sabiendo que se han escogido los de tipo toriesféricas debido a la facilidad que proporcionan para las operaciones de mantenimiento.

Según el código A.S.M.E, [13] y [24], las fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales son las siguientes de la **figura 11.11**:

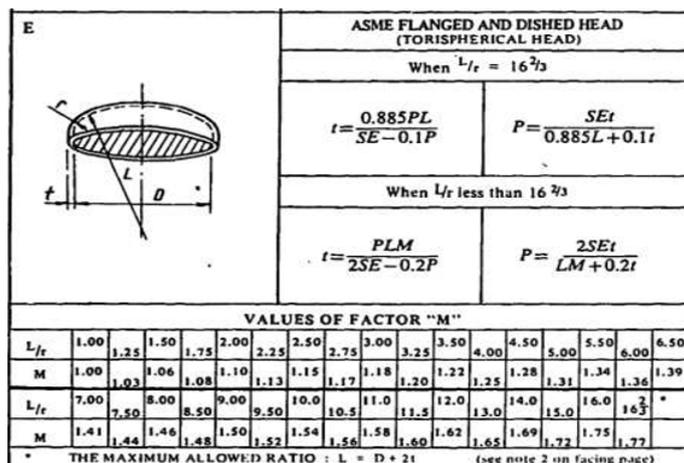


Figura 11.11. Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales.

Dónde:

Si  $t_{min,c}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,c}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{min,c}/L = 15 \text{ mm}/3440 \text{ mm} = 0,0045 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 3440 = 206,4 \text{ mm}$ ,  $L = 3440 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 3440 \text{ mm}/206,4 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.11**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

$$\text{Ecuación 11.11 } t_{cab} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 6,92 \text{ atm} \cdot 3440 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,1 \cdot 6,92 \text{ atm}} = 23,22 \text{ mm}$$

Debido a que los espesores de los cabezales y el cuerpo cilíndrico de la carcasa del reactor son diferentes, se ha decidido unificar escogiendo el espesor mayor para toda la carcasa del reactor, teniendo así un grosor de unos 25 mm sobredimensionados, por lo que el diámetro exterior del reactor pasará a ser:

$$\text{Ecuación 11.12 } D_{ext,c} = D_{int,c} + 2 \cdot t_{cab} = 3440 \text{ mm} + 2 \cdot 25 \text{ mm} = 3490 \text{ mm} = 3,49 \text{ m}$$

Así mismo, debido a que se han añadido dos cabezales, la longitud del reactor ya no será de 6 m exactamente, faltará sumarle la longitud de los cabezales que se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.13 } L_{cab} = h + f = 0,0875 \text{ m} + 0,671 \text{ m} = 0,758 \text{ m}$$

Dónde:

$$\text{Ecuación 11.14 } h = 3,5 \cdot t_{cab} = 3,5 \cdot 0,025 \text{ m} = 0,0875 \text{ m}$$

$$\text{Ecuación 11.15 } f = 0,195 \cdot D_{ext,c} - 0,455 \cdot t_{cab} = 0,195 \cdot 3,49 \text{ m} - 0,455 \cdot 0,025 \text{ m} = 0,671 \text{ m}$$

Por lo que, la longitud real y final del reactor pasará a ser la siguiente:

$$\text{Ecuación 11.16 } L_{reactor} = L_c + 2 \cdot L_{cab} = 6 \text{ m} + 2 \cdot 0,758 \text{ m} = 7,52 \text{ m}$$

La longitud o altura final del reactor será de 7,52 m.

### Espesor de las placas tubulares

Por último, se procede al cálculo del espesor de las placas tubulares del reactor. Este elemento es de vital importancia, suelen ser de acero inoxidable y sirve para sostener en ambos extremos del reactor los tubos mediante soldadura o expansión y, a la vez, juega un papel muy importante en el intercambio de calor. Así mismo, suele ser una de las partes más costosas y lentas en fabricación debido a su elevado espesor.

El cálculo de su espesor es el que la siguiente fórmula, **[13]** y **[24]**, detalla:

$$\text{Ecuación 11.17 } t_{placa} = \frac{D_{int,c}}{2} \cdot \sqrt{\frac{P}{S}} = \frac{3440 \text{ mm}}{2} \cdot \sqrt{\frac{6,92 \text{ atm}}{1068,32 \text{ atm}}} = 138,43 \text{ mm} \sim 140 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{placa}$  = espesor mínimo de las placas tubulares (mm)

$D_{int,c}$  = diámetro interno de la carcasa (mm)

$P$  = presión de diseño del lado de carcas (atm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

Tal y como se ha podido calcular, el espesor de las placas tubulares será de 139 mm y, este valor, coincide con el rango encontrado de valores típicos de los espesores entre 50-450mm.

### Espesor de las pantallas deflectoras

Para el caso del cálculo de las pantallas deflectoras se usará el mismo procedimiento anterior, **ecuación 11.17** y, por tanto, el valor del espesor será el mismo, de 139mm:

$$\text{Ecuación 11.7 } t_{pantalla} = \frac{D_{int,c}}{2} \cdot \sqrt{\frac{P}{S}} = \frac{3440 \text{ mm}}{2} \cdot \sqrt{\frac{6,92 \text{ atm}}{1068,32 \text{ atm}}} = 138,43 \text{ mm} \sim 140 \text{ mm}$$

### 11.1.2.3 Balance de energía

Debido a que tratamos con dos reacciones exotérmicas será imprescindible conocer el caudal de calor a eliminar para así poder mantener una temperatura de operación óptima y constante sobre unos 270°C.

Según la información facilitada sobre el proceso del óxido de etileno, y debido a la alta contribución de las reacciones secundarias, los procesos industriales alcanzan una selectividad próxima al 80%, en los que se produce un desprendimiento medio de calor de aproximadamente 500 kJ/mol de etileno consumido.

Así mismo, según el balance de energía realizado en el Aspen Hysys el calor generado en cada uno de los reactores es el siguiente:

$$Q_{generada} = 56.446.533,53 \text{ kJ/h} = 5,64 \cdot 10^7 \text{ kJ/h}$$

Una vez conocida la cantidad de calor generada, falta encontrar el área de intercambio de calor que proporcionan los diferentes tubos para la posterior eliminación de calor del reactor que se determina de la siguiente manera:

**Ecuación 11.18**  $A_{intercamb} = \pi \cdot D_{ext} \cdot L_{tub} \cdot N_{tub} = \pi \cdot 36 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 6 \text{ m} \cdot 5160 = 3501,49 \text{ m}^2$

Dónde:

$A_{intercamb}$  = área de intercambio de calor de los tubos ( $\text{m}^2$ )

$D_{ext}$  = diámetro externo de los tubos (m)

Primero, pero, es necesario conocer el diámetro externo, calculando primero a continuación el grosor de los tubos, de la siguiente forma:

**Ecuación 11.19**  $D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot \Delta X = 32 \cdot 10^{-3} + (2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) = 36 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Dónde:

$\Delta X$  = grosor de los tubos (m)

No obstante, el grosor de los tubos se podrá calcular siguiendo la normativa A.S.M.E, [13] y [24], que hace referencia a las normas internacionales de diseño para el espesor mínimo de recipientes tubulares a presión de la siguiente manera:

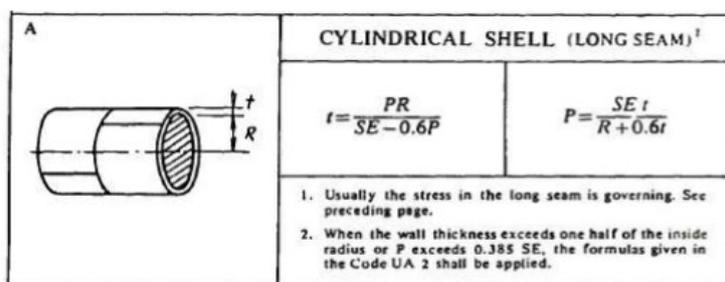


Figura 11.12. Fórmulas para el cálculo del espesor de los tubos.

$$\text{Ecuación 11.20 } t_{\min,tub} = \frac{P_{tub} \cdot R_{int,tub}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{tub}} + C_1 = \frac{20 \text{ atm} \cdot 16 \text{ mm}}{952,64 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 20 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} = 1,90 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{\min,tub}$  = grosor mínimo de los tubos (mm)

$P_{tub}$  = presión de operación en los tubos (atm)

$S$  = Esfuerzo del material (atm)

$E$  = factor de eficacia de soldadura (normalmente para este material se usa 0,85)

$R_{int,tub}$  = radio interno de los tubos (mm)

$C_1$  = constante de resistencia a la corrosión (suele ser de 0,1 mm/año)

Cabe especificar que, si consideramos que nuestra planta será hábil durante 15 años, la constante de resistencia a la corrosión será de 1,5mm. Así mismo, el valor del esfuerzo del material (en este caso acero 316L) se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11.8. Valores de los esfuerzos materiales según el acero escogido (316L) y la temperatura de diseño (270°C).

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL														
(CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)														
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	—	—	—
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	—	—

Tal y como se puede observar, y considerando la temperatura de diseño unos 270°C o 527°F, según la **tabla 11.8** corresponde a un valor de  $S \sim 14 \text{ ksi}$ , o lo que vienen a ser unas 952,64 atm.

Por tanto, y teniendo en cuenta que el espesor mínimo encontrado es de unos 1,90 mm, este se sobredimensionará a 2 mm para evitar posibles problemas.

A continuación, se procede a calcular el coeficiente de transferencia de calor (U). Para ello, se realiza una aproximación sobre la temperatura de operación, considerándose esta constante y de unos 270°C y una temperatura del fluido refrigerante (agua) de 190°C:

$$\text{Ecuación 11.21 } Q_{generada} = U \cdot A_{intercamb} \cdot (T_{fluido} - T_{refrig})$$

Dónde:

$U = \text{coeficiente de transferencia de calor } (W/(m^2 \cdot K))$

$T_{fluido} = \text{temperatura del fluido gas } (^{\circ}C)$

$T_{refrig} = \text{temperatura del fluido refrigerante (agua)} (^{\circ}C)$

Por lo tanto, el valor del coeficiente de transmisión de calor es:

$$U = \frac{15679592 \text{ J/s}}{3501,49 \text{ m}^2 \cdot (270 \text{ }^{\circ}C - 190 \text{ }^{\circ}C)} = 55,97 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 46,36 \frac{kcal}{h \cdot m^2 \cdot K}$$

Para comprobar la veracidad de dicho valor se ha realizado un cálculo iterativo del coeficiente global a partir de los coeficientes individuales siguiendo el método de Kern.

En primer lugar, se calculará el coeficiente individual del fluido que pasa por tubos, la mezcla gaseosa. Se calcula el área de paso de un tubo y, posteriormente, de todos los tubos, teniendo en cuenta la fracción de vacío de los tubos:

$$\text{Ecuación 11.22 } A_{p1tub} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int,tub}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (32 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 = 4,02 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$\text{Ecuación 11.23 } A_{ptub} = N_{tub} \cdot \frac{A_{p1tub}}{n_{ptub}} = 5160 \cdot \frac{4,02 \cdot 10^{-4} m^2}{1} = 2,075 m^2$$

A continuación, se calcula el caudal de la mezcla por unidad de área:

$$\text{Ecuación 11.24 } G_{tub} = \frac{m_{fluido}}{A_{ptub}} = \frac{196669,9 \text{ kg/h}}{2,075 m^2} = 94782,53 \frac{kg}{h \cdot m^2} = 26,33 \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

Dónde:

$m_{fluido} = \text{caudal másico de la mezcla gasosa por tubos } (\frac{kg}{h})$

$G_{fluido} = \text{caudal másico de la mezcla gasosa por unidad de área } (\frac{kg}{h \cdot m^2})$

En siguiente lugar, se procede al cálculo de los números adimensionales de Reynolds, Prandtl y el Nusselt para el posterior cálculo del coeficiente individual. Para esto, se necesitarán los valores aportados por Hysys de la viscosidad, conductividad térmica y calor específica de la mezcla:

$$k = 4,41 \cdot 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$c_p = 1,36 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 1360 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\mu = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

Dónde:

$k$  = conductividad térmica de la mezcla ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )

$c_p$  = calor específica de la mezcla a  $270^\circ\text{C}$  ( $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ )

$\mu$  = viscosidad de la mezcla ( $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ )

Por tanto, los números de Reynolds, Prandtl y Nusselt serán los siguientes:

$$\text{Ecuación 11.25 } Re_{tub} = \frac{D_{int,tub} \cdot G_{tub}}{\mu} = \frac{0,032 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 26,33 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2}{2,6 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 16498,13$$

$$\text{Ecuación 11.26 } Pr_{tub} = \frac{c_p \cdot \mu}{k} = \frac{1360 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{4,41 \cdot 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}} = 0,788$$

$$\text{Ecuación 11.27 } Nu = J_H \cdot Pr^{0,33} = 0,027 \cdot Re_{tub}^{0,8} \cdot Pr^{0,33} = 0,027 \cdot 16498,13^{0,8} \cdot 0,788^{0,33} = 59,03$$

Por tanto, conociendo el valor de Nusselt, se procede al cálculo del coeficiente individual de transmisión de calor por tubos de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.28 } h_{tub} = \frac{Nu \cdot k}{D_{int,tub}} = \frac{59,03 \cdot 4,41 \cdot 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,032 \cdot 0,5 \text{ m}} = 162,66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

A continuación, se procederá a realizar el mismo cálculo del coeficiente individual, pero para el lado de carcasa. En primer lugar, se procede al cálculo del caudal másico de refrigerante con la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 11.29 } Q_{generada} = m \cdot \lambda + m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Dónde:

$m = \text{caudal másico del refrigerante (kg/s)}$

$cp = \text{capacidad calorífica del refrigerante } \left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$

$\lambda = \text{Calor latente del refrigerante } \left(\frac{J}{kg}\right)$

No obstante, como se ha considerado que no existe un salto térmico del fluido refrigerante entre la entrada y la salida del reactor, el cálculo del caudal másico de refrigerante queda de la siguiente manera, considerando el calor latente del agua a hirviendo es de aproximadamente de 1964 kJ/kg:

$$m = \frac{Q_{generada}}{\lambda} = \frac{15679592 \text{ J/s}}{1964000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 7,98 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 28740,60 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Por lo tanto, el caudal másico de agua a usar es de 7,98 kg/s = 28740,60 kg/h.

A continuación, se determinarán el número de pantallas deflectoras y su separación. Para poder determinar las características de las pantallas deflectoras existen dos parámetros a definir:

- $I_B$  es el espaciado entre pantallas con un valor entre un rango de 0,2 y 1 veces el diámetro interno de la carcasa, siendo los valores óptimos entre 0,3 y 0,5 veces el diámetro de carcasa. Se ha escogido un valor de 0,4.
- *Baffle cut*, es el espacio que queda entre la pantalla y la carcasa, por donde pasa el fluido del costado de la carcasa. Se expresará en un porcentaje, valor que suele oscilar entre un 15 y un 45% del diámetro interno de la carcasa. Siendo los valores óptimos entre 20 y 25%. Se ha escogido un valor de 22,5%.

Los cálculos pertinentes son los siguientes:

**Ecuación 11.30**  $Baffle\ cut = 0,225 \cdot D_c = 0,225 \cdot 3,44 = 0,774 \text{ m}$

**Ecuación 11.31**  $I_B = 0,4 \cdot D_c = 0,4 \cdot 3,44 = 1,38 \text{ m}$

**Ecuación 11.32**  $Pitch = 1,25 \cdot D_{ext,tub} = 1,25 \cdot 0,036\text{m} = 0,045 \text{ m}$

Una vez obtenidos los valores anteriores, se pueden llegar a calcular el número de pantallas deflectoras como se muestra a continuación:

**Ecuación 11.33**  $N_{pantallas} = \frac{L_{tub}}{I_B} - 1 = \frac{6 \text{ m}}{1,38 \text{ m}} - 1 = 3,36 \approx 4 \text{ pantallas deflectoras}$

En siguiente lugar, se pretende calcular la velocidad del fluido que pasará por la carcasa de la siguiente manera, calculando primero de todo, el área transversal de la carcasa, teniendo en cuenta un número de pasos por carcasa de 2:

$$\text{Ecuación 11.34 } A_{TC} = \frac{I_B \cdot D_{int,c} \cdot (\text{pitch} - D_{ext,tub})}{\text{pitch} \cdot n_{pc}} = \frac{1,38 \text{ m} \cdot 3,44 \text{ m} \cdot (0,045 - 0,036) \text{ m}}{0,045 \text{ m} \cdot 2} = 0,474 \text{ m}^2 \sim 0,48 \text{ m}^2$$

A partir del área transversal de la carcasa es posible calcular la velocidad del fluido por carcasa de la siguiente manera, teniendo en cuenta que este suele estar entre 0,3 y 3m/s:

$$\text{Ecuación 11.35 } v_c = \frac{m_c}{\rho_c \cdot A_{TC}} = \frac{7,98 \text{ kg/s}}{9,9 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,48 \text{ m}^2} = 1,70 \text{ m/s}$$

Dónde:

$$m_c = \text{caudal másico del refrigerante (agua)} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$\rho_c = \text{densidad del vapor de agua a } 190^\circ\text{C} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

A continuación, se calcula el caudal del refrigerante por unidad de área:

$$\text{Ecuación 11.36 } G_c = \frac{m_c}{A_{TC}} = \frac{28740,60 \text{ kg/h}}{0,48 \text{ m}^2} = 60718,20 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2 = 16,87 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$$

Dónde:

$$m_c = \text{caudal másico del refrigerante por carcasa} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

$$G_c = \text{caudal másico del refrigerante por unidad de área} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \right)$$

En siguiente lugar, se procede al cálculo de los números adimensionales de Reynolds, Prandtl y el Nusselt para el posterior cálculo del coeficiente individual por carcasa. Para esto, se necesitarán los valores aportados por Hysys de la viscosidad, conductividad térmica y calor específica del refrigerante a 190°C, y calcular el diámetro equivalente según el pitch escogido:

$$k = 6,91 \cdot 10^{-1} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$Cp = 4,46 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 4460 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\mu = 1,31 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\text{Ecuación 11.37 } D_{eq} = \frac{1,1}{D_{ext,tub}} \cdot (\text{pitch}^2 - 0,917 \cdot D_{ext,tub}^2) = \frac{1,1}{0,036} \cdot (0,045^2 - 0,917 \cdot 0,036^2) = 0,0255 \text{ m}$$

Dónde:

$k =$  conductividad térmica de la mezcla ( $W/m \cdot K$ )

$C_p =$  calor específica de la mezcla a  $270^\circ C$  ( $kJ/kg \cdot K$ )

$\mu =$  viscosidad de la mezcla ( $kg/m \cdot s$ )

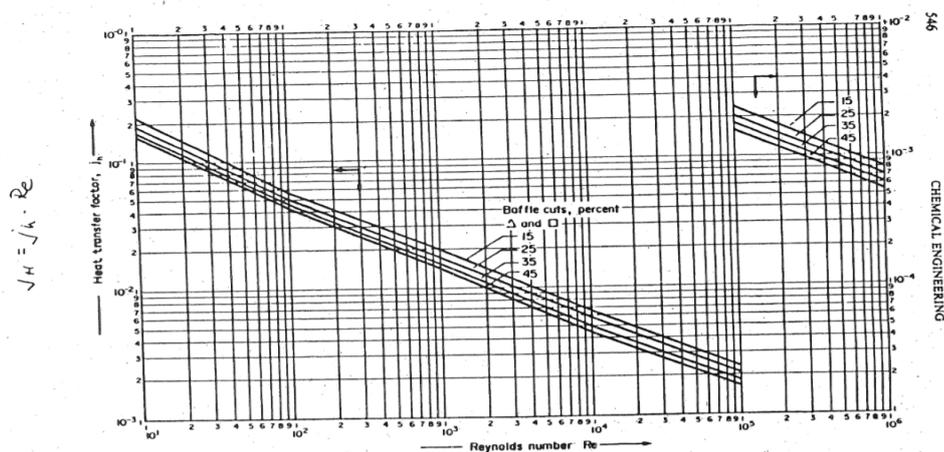
$D_{eq} =$  diámetro equivalente (m)

Por tanto, los números de Reynolds, Prandtl y Nusselt serán los siguientes:

$$\text{Ecuación 11.38 } Re_c = \frac{D_{eq} \cdot G_c}{\mu} = \frac{0,0255 \text{ m} \cdot 16,87 \frac{kg}{s \cdot m^2}}{1,31 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s}} = 3288,25$$

$$\text{Ecuación 11.39 } Pr_c = \frac{C_p \cdot \mu}{k} = \frac{4460 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 1,31 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s}}{6,91 \cdot 10^{-1} \frac{W}{m \cdot K}} = 0,846$$

Para el cálculo del Nusselt, pero, es necesario encontrar el valor de  $j_h$  en el siguiente gráfico, dependiendo de nuestro valor de Reynolds y del Baffle cut elegido:



**Figura 11.13.** Representación gráfica que relaciona el valor de Reynolds por tubos con el factor de transferencia de calor  $j_h$ .

Por tanto, según se puede observar en la **figura 11.13**, con un valor de Reynolds de 3288 y un Baffle cut del 22,5%, el valor de  $j_h$  es aproximadamente de 0,015:

$$\text{Ecuación 11.40 } Nu = j_h \cdot Re^{\frac{2}{3}} \cdot Pr^{-0,7} = 0,015 \cdot 3288^{\frac{2}{3}} \cdot 0,846^{-0,7} = 3,73$$

Por tanto, conociendo el valor de Nusselt, se procede al cálculo del coeficiente individual de transmisión de calor por carcasa de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.41 } h_c = \frac{Nu \cdot k}{D_{eq}} = \frac{3,73 \cdot 6,91 \cdot 10^{-1} \frac{W}{m \cdot K}}{0,0255 \text{ m}} = 100,75 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 86,69 \frac{kcal}{h \cdot m^2 \cdot K}$$

Por último, una vez conocidos los dos coeficientes de transmisión de calor individuales, se procede al cálculo del coeficiente global real y a su comparación con el calculado al principio de este punto para también comprobar que el balance de energía se cumpla:

$$\text{Ecuación 11.42} \quad \frac{1}{U_R} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_R} + \frac{D_{ext,t} \cdot \ln\left(\frac{D_{ext,t}}{D_{int,t}}\right)}{2 \cdot k} + \frac{D_{ext,t}}{D_{int,t}} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{D_{ext,t}}{D_{int,t}} \cdot \frac{1}{h_{tub}}$$

$$\frac{1}{U_R} = \frac{1}{100,75} + \frac{1}{11111,1} + \frac{0,036 \cdot \ln\left(\frac{0,036}{0,032}\right)}{2 \cdot 16,3} + \frac{0,036}{0,032} \cdot \frac{1}{5555,5} + \frac{0,036}{0,032} \cdot \frac{1}{162,66} = 0,0173$$

$$U_R = 1/0,0173 = 57,92 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Dónde:

$U_R$  = coeficiente global real de transmisión de calor ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$h_c$  = coeficiente individual de transmisión de calor por carcasa ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$h_R$  = factor de ensuciamiento para el lado de carcasa ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

Según el fluido que pasa por carcasa,  $h_R=11111,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$D_{ext,t}$  = diámetro externo de tubos (m)

$D_{int,t}$  = diámetro interno de tubos (m)

$k$  = conductividad térmica del acero 316L ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )

El valor de la conductividad del acero es de  $16,3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , [18] y [8].

$R_t$  = factor de ensuciamiento para el lado de tubos ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

Según el fluido que pasa por tubos,  $R_T=5555,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$h_{tub}$  = coeficiente individual de transmisión de calor por carcasa ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

Tal y como se puede observar, el valor del coeficiente global de transmisión de calor real es mayor al calculado inicialmente del balance, pero sin superar el 15% de límite que existe para que no se encuentre dimensionado el sistema, de hecho, únicamente es un 3,36% mayor:

$$U_R = 57,92 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} > U = 55,97 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Así mismo, tanto el valor del coeficiente individual del fluido de carcasa (86,69 kcal/m<sup>2</sup>·K) como el valor del coeficiente global (55,97 W/m<sup>2</sup>·K) se encuentran dentro del rango típicos para cada caso: 75-150 kcal/m<sup>2</sup>·K para líquidos en ebullición y 30-100 W/m<sup>2</sup>·K para gases usando vapor de agua como refrigerante, respectivamente.

#### 11.1.2.4 Pérdidas de presión por tubos y carcasa

En este apartado se procederá al cálculo de la pérdida de presión (pérdida de carga) debido a que en reactores de lecho fijo es un factor de gran importancia y a tener en cuenta. Se calcularán tanto la pérdida de carga por tubos como por carcasa, calculando primero el número de Reynolds

- Pérdida de presión por tubos

Según el método de Kern que se ha ido siguiendo en todo este capítulo para el cálculo de diversos parámetros de la carcasa del reactor, la pérdida de presión por tubos se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.43 } \Delta P_{tub} = 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho_{fluido} \cdot v_{tub}^2}{2} \cdot \left( \frac{L_{tub}}{D_{int,tub}} \right)$$

Dónde:

$\Delta P_{tub}$  = pérdida de presión por tubos (Pa)

$\rho_{fluido}$  = densidad de la mezcla gasosa ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$v_{tub}$  = velocidad del fluido por tubos ( $\frac{m}{s}$ )

$L_{tub}$  = longitud de los tubos (m)

$D_{int,tub}$  = diámetro interno del tubo (m)

$j_f$  = factor de fricción, obtenido a partir de la gráfica de Coulson y a partir de Reynolds

Para poder leer correctamente la gráfica de Coulson se necesita conocer el valor del número de Reynolds que se calculará a continuación.

En primer lugar, se calcula el área de paso de un tubo y, posteriormente de todos los tubos:

$$\textbf{Ecuación 11.22} \quad A_{p1tub} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int,tub}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (32 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 = 4,02 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.23} \quad A_{ptub} = N_{tub} \cdot \frac{A_{p1tub}}{n_{ptub}} = 5160 \cdot \frac{4,02 \cdot 10^{-4} m^2}{1} = 2,07 m^2$$

A continuación, se calcula el caudal de la mezcla por unidad de área:

$$\textbf{Ecuación 11.24} \quad G_{fluido} = \frac{m_{fluido}}{A_{ptub}} = \frac{196669,88 \frac{kg}{h}}{2,07 m^2} = 94782,53 \frac{kg}{h \cdot m^2}$$

Dónde:

$$m_{fluido} = \text{caudal másico de la mezcla gasosa por tubos} \left( \frac{kg}{h} \right)$$

$$G_{fluido} = \text{caudal másico de la mezcla gasosa por unidad de área} \left( \frac{kg}{h \cdot m^2} \right)$$

Finalmente, el cálculo del número de Reynolds es el siguiente:

$$\textbf{Ecuación 11.25} \quad Re = \frac{D_{int,tub} \cdot G_{fluido}}{\mu} = \frac{0,032 \cdot 0,5 m \cdot 94782,53 \frac{kg}{h \cdot m^2}}{0,092 \frac{kg}{h \cdot m}} = 16498,13$$

Dónde:

$$\mu = \text{viscosidad de la mezcla} \left( \frac{kg}{h \cdot m} \right)$$

$Re$  = número de Reynolds

A partir de la siguiente gráfica, se encuentra el valor de la constante de fricción:

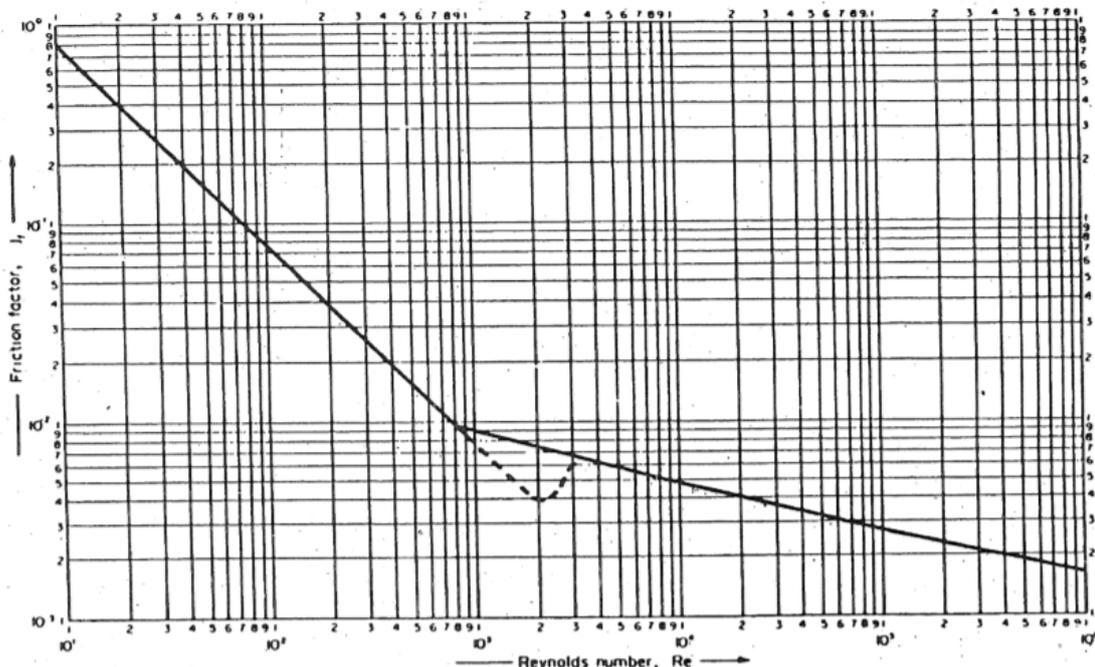


FIG. 12.24. Tube-side friction factors

Note: The friction factor  $j_f$  is the same as the friction factor for pipes  $\phi \left( = \frac{R}{\rho u^2} \right)$ , defined in Volume I Chapter 3.

Figura 11.14. Representación gráfica que relaciona el valor de Reynolds por carcasa con el factor de fricción  $j_f$ .

Para un valor de Reynolds de 16498,13 se ha encontrado un valor de  $j_f=0,004$  en la figura 11.14, por lo que el valor de la pérdida de presión es la siguiente:

$$\text{Ecuación 11.43 } \Delta P_{tub} = 8 \cdot 0,004 \cdot \frac{12,64 \frac{kg}{m^3} \cdot (1,04 \frac{m}{s})^2}{2} \cdot \left( \frac{6 m}{0,032 m} \right) = 41,01 Pa$$

$$\Delta P_{tub} = 41,01 Pa = 41,01 \frac{N}{m^2} = 4,1 \cdot 10^{-2} \frac{kN}{m^2}$$

- Pérdida de carga para carcasa:

Según el método de Kern que se ha ido siguiendo en todo este capítulo para el cálculo de diversos parámetros de la carcasa del reactor, la pérdida de presión por carcasa se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.44 } \Delta P_c = n_{pc} 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho_{fluido,c} \cdot v_c^2}{2} \cdot \left( \frac{D_{int,c}}{D_{eq}} \right) \cdot \left( \frac{L_c}{I_B} \right)$$

Dónde:

$\Delta P_c$  = pérdida de presión por carcasa (Pa)

$\rho_{fluido,c}$  = densidad del líquido refrigerante ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$v_c$  = velocidad del refrigerante por carcasa ( $\frac{m}{s}$ )

$L_c$  = longitud de la carcasa (m)

$D_{int,c}$  = diámetro interno de la carcasa (m)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la carcasa (m)

$I_B$  = espaciado entre pantallas (m)

$j_f$  = factor de fricción, obtenido a partir de la gráfica de Coulson y a partir de Reynolds

Para poder leer correctamente la gráfica de Coulson se necesita conocer el valor del número de Reynolds por carcasa que se calculará a continuación.

En primer lugar, se calcula el caudal del refrigerante por unidad de área:

$$\text{Ecuación 11.36 } G_c = \frac{m_c}{A_{Tc}} = \frac{28740,59 \text{ kg/h}}{0,47 \text{ m}^2} = 60718,20 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$$

Dónde:

$m_c$  = caudal másico de la mezcla gasosa por tubos ( $\frac{kg}{h}$ )

$A_{Tc}$  = área transversal de la carcasa ( $\text{m}^2$ )

$G_c$  = caudal másico de la mezcla gasosa por unidad de área ( $\frac{kg}{h \cdot \text{m}^2}$ )

En segundo lugar, se calcula el diámetro equivalente de la carcasa:

$$\text{Ecuación 11.37 } D_{eq} = \frac{1,1}{D_{ext,tub}} \cdot (\text{Pitch}^2 - 0,917 \cdot D_{ext,tub}^2) = \frac{1,1}{0,036} \cdot (0,045^2 - 0,917 \cdot 0,036^2) = 0,0255 \text{ m}$$

Finalmente, el cálculo del número de Reynolds para carcasa es el siguiente:

$$\text{Ecuación 11.38 } Re = \frac{D_{eq} \cdot G_c}{\mu_c} = \frac{0,0255 \text{ m} \cdot 60718,20 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2}{0,47 \frac{kg}{h \cdot m}} = 3288,25$$

Dónde:

$$\mu_c = \text{viscosidad del agua como refrigerante a } 190^\circ\text{C} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}} \right)$$

$Re$  = número de Reynolds por carcasa

A partir de la siguiente gráfica, se encuentra el valor de la constante de fricción:

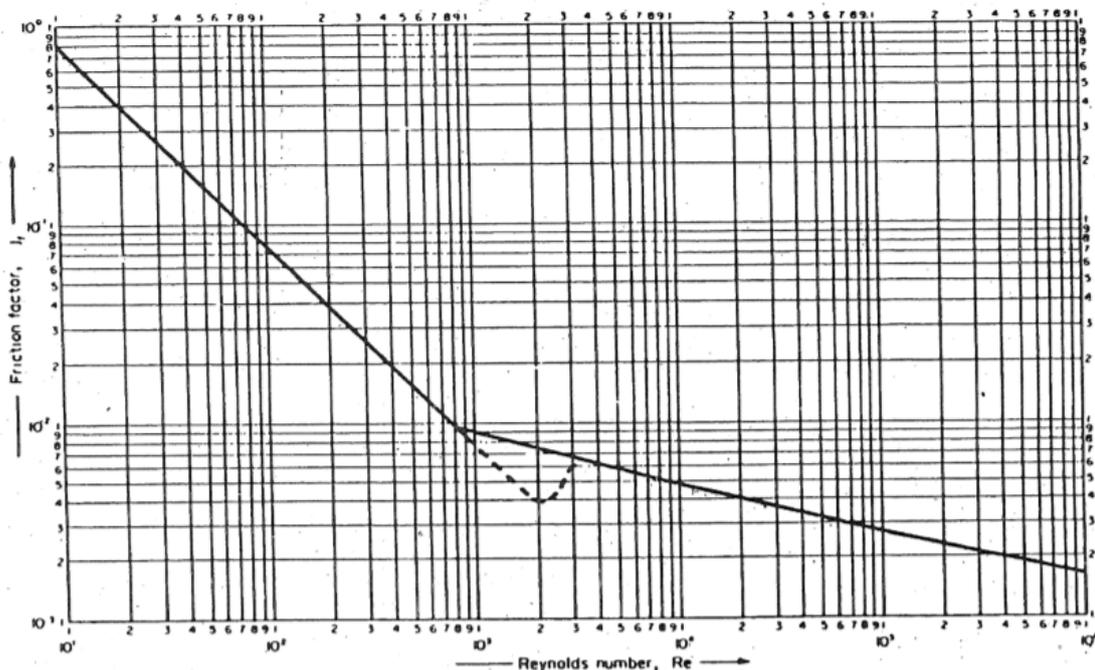


FIG. 12.24. Tube-side friction factors

Note: The friction factor  $j_f$  is the same as the friction factor for pipes  $f \left( = \frac{R}{\rho u^2} \right)$ , defined in Volume 1 Chapter 3.

Figura 11.15. Representación gráfica que relaciona el valor de Reynolds de carcasa con el factor de fricción  $j_f$ .

Para un valor de Reynolds de 3288,25 se ha encontrado un valor de  $j_f=0,0065$  en la figura 11.15, por lo que el valor de la pérdida de presión es la siguiente:

$$\text{Ecuación 11.44 } \Delta P_c = 2 \cdot 8 \cdot 0,0065 \cdot \frac{9,90 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (1,70 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \cdot \left( \frac{7,52 \text{ m}}{1,38 \text{ m}} \right) \cdot \left( \frac{3,44 \text{ m}}{0,0255 \text{ m}} \right) = 1093 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_c = 1093 \text{ Pa} = 1093 \text{ N/m}^2 = 1,093 \text{ kN/m}^2$$

Por tanto, tal y como se observa, se puede considerar que la pérdida de presión por carcasa es prácticamente despreciable debido a que para líquidos con viscosidades menores a 1 cP, el valor máximo puede llegar a ser 70 kN/m<sup>2</sup>.

### 11.1.2.5 Aislamiento de los reactores

En caso de trabajar a temperaturas elevadas tanto en carcasa como en tubos, como es nuestro caso 190 y 270°C respectivamente, es necesario implementar un aislante, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.45 } t_{\text{aislante}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{\text{ext},c}}\right)^{\frac{1}{4}}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{190^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{3,49 \text{ m} \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 9,97 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del reactor (°C)

$D_{\text{ext},c}$  = diámetro externo de la carcasa (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8-10-12 cm, **[11]**, por lo que el grosor de 9,97 se aproximará a un grosor de 10 cm. Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\text{Ecuación 11.46 } V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 104,91 \text{ m}^2 \cdot 0,10 \text{ m} = 10,49 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante (m<sup>3</sup>)

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\text{Ecuación 11.47 } S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext},c} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 82,23 \text{ m}^2 + 2 \cdot 11,34 \text{ m}^2 = 104,91 \text{ m}^2$$

$$\text{Ecuación 11.48 } S_{\text{ext},c} = \pi \cdot D_{\text{ext},c} \cdot L_c = \pi \cdot 3,49 \text{ m} \cdot 7,5 \text{ m} = 82,23 \text{ m}^2$$

$$\text{Ecuación 11.49 } S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext},c}^2 = 0,931 \cdot 3,49 \text{ m}^2 = 11,34 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales (m<sup>2</sup>)

$S_{\text{ext},c}$  = sección externa de la carcasa (m<sup>2</sup>)

$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa del reactor (m<sup>2</sup>)

### 11.1.3 Volumen y peso de los reactores

#### 11.1.3.1 Volumen de los reactores

En este apartado se procede a calcular el volumen final de los tres reactores, teniendo en cuenta el volumen de la carcasa, que ya incluye el volumen de tubos de catalizador, y el de los cabezales según las siguientes expresiones:

$$\textbf{Ecuación 11.50} \quad V_{carcasa} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int,c}^2 \cdot L_{tub} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,44 \text{ m})^2 \cdot 6 \text{ m} = 55,76 \text{ m}^3$$

$$\textbf{Ecuación 11.51} \quad V_{cabezales} = \frac{\pi}{8} \cdot D_{int,c}^3 \cdot 0,1247 = \frac{\pi}{8} \cdot (3,44 \text{ m})^3 \cdot 0,1247 = 1,99 \text{ m}^3$$

$$\textbf{Ecuación 11.52} \quad V_{reactor} = V_{carcasa} + 2 \cdot V_{cabezales} = 55,76 \text{ m}^3 + 2 \cdot 1,99 \text{ m}^3 = 59,74 \text{ m}^3$$

Por tanto, finalmente se tendrá tres reactores de aproximadamente 60 m<sup>3</sup>, dos de ellos activos y uno parado.

#### 11.1.3.2 Peso de los reactores

##### Peso de los reactores vacíos:

En primer lugar, se calcula el peso de los reactores en vacío teniendo en cuenta únicamente el peso de los tubos, de la carcasa, de los cabezales y de las placas tubulares. Así mismo, el peso total de los reactores vacíos se les aplicará un 10% de sobredimensionamiento para tener en cuenta soldaduras, bridas, entre otros.

$$\textbf{Ecuación 11.53} \quad M_{carcasa} = \rho_{acero \ 316L} \cdot S_{int,c} \cdot t_{min,c}$$

$$\textbf{Ecuación 11.54} \quad M_{tub} = \rho_{acero \ 316L} \cdot N_{tub} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,tub}^2 - D_{int,tub}^2) \cdot L_{tub}$$

$$\textbf{Ecuación 11.55} \quad M_{cabezal} = \rho_{acero \ 316L} \cdot S_{int,cabezal} \cdot t_{cabezal}$$

$$\textbf{Ecuación 11.56} \quad M_{placa \ tub} = \rho_{acero \ 316L} \cdot (V_{placa} - V_{tub,placa})$$

$$\textbf{Ecuación 11.57} \quad M_{total} = (M_{carcasa} + M_{tub} + 2 \cdot M_{cabezal} + 2 \cdot M_{placa \ tub}) \cdot 1,1$$

Dónde:

$\rho_{\text{acero 316L}}$  = densidad del acero inoxidable 316L ( $\text{kg/m}^3$ )

$S_{\text{int},c}$  = sección interna de la carcasa ( $\text{m}^2$ )

$t_{\text{min},c}$  = espesor mínimo de la carcasa (m)

$N_{\text{tub}}$  = número de tubos

$D_{\text{ext},\text{tub}}$  = diámetro externo de tubos (m)

$D_{\text{int},\text{tub}}$  = diámetro interno de tubos (m)

$L_{\text{tub}}$  = longitud de tubos (m)

$S_{\text{int},\text{cabezal}}$  = sección interna de los cabezales ( $\text{m}^2$ )

$t_{\text{cabezal}}$  = espesor de los cabezales (m)

$V_{\text{placa}}$  = volumen de la placa tubular ( $\text{m}^3$ )

$V_{\text{tub,placa}}$  = volumen que ocupan los tubos en la placa tubular ( $\text{m}^3$ )

Primero de todo, se ha encontrado en [18] y [8] de la bibliografía de este capítulo, que la densidad del acero inoxidable 316L es de  $8000\text{kg/m}^3$ .

En segundo lugar, se procede al cálculo de las secciones internas de la carcasa y de los cabezales de la siguiente manera, teniendo en cuenta que la longitud de la carcasa ahora viene dado sumando la de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.58 } S_{\text{int},c} = \pi \cdot D_{\text{int},c} \cdot L_c = \pi \cdot 3,44 \text{ m} \cdot 7,52 \text{ m} = 81,27 \text{ m}^2$$

$$\text{Ecuación 11.59 } S_{\text{int},\text{cabezal}} = 0,931 \cdot D_{\text{int},\text{cabezal}}^2 = 0,931 \cdot (3,44^2) = 11,02 \text{ m}^2$$

Por último, se calcula el volumen de las placas tubulares y el que ocupan los tubos en ella de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.60 } V_{\text{placa}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int},c}^2 \cdot t_{\text{placa}} = \frac{\pi}{4} \cdot 3,44\text{m}^2 \cdot 0,139 \text{ m} = 1,29 \text{ m}^3$$

$$\text{Ecuación 11.61 } V_{\text{tub,placa}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{ext},\text{tub}}^2 \cdot t_{\text{placa}} \cdot N_{\text{tub}} = \frac{\pi}{4} \cdot 0,036\text{m}^2 \cdot 0,139 \text{ m} \cdot 5160 = 0,73 \text{ m}^3$$

Por tanto, los pesos de las diferentes partes de los reactores serán:

$$M_{carcasa} = 8000 \frac{kg}{m^3} \cdot 81,27 m^2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} m = 16254 kg = 16,25 tn$$

$$M_{tub} = 8000 \frac{kg}{m^3} \cdot 5160 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,036m^2 - 0,032m^2) \cdot 6 m = 52911,46 kg = 52,91 tn$$

$$M_{cabezal} = 8000 \frac{kg}{m^3} \cdot 11,02m^2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} m = 2204 kg = 2,20 tn$$

$$M_{placa tub} = 8000 \frac{kg}{m^3} \cdot (1,29 m^3 - 0,73 m^3) = 4480 kg = 4,48 tn$$

Por último, el peso total de los reactores teniendo en cuenta el 10% de sobredimensionamiento será el siguiente:

$$\begin{aligned} M_{total} &= (16254 kg + 52911,46 kg + 2 \cdot 2204 kg + 2 \cdot 4480 kg) \cdot 1,1 \\ &= 90786,81 kg \sim 90787 kg = 90,79 tn \end{aligned}$$

Peso de los reactores en prueba:

En este apartado se calculará el peso de los reactores si los llenamos de agua en condiciones de prueba.

$$\begin{aligned} \textbf{Ecuación 11.62} \quad M_{reactor\ agua} &= M_{total} + \rho_{agua} \cdot V_{reactor} = 90787 + 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 60 m^3 = \\ &150787 kg = 150,8 tn \end{aligned}$$

Dónde:

$M_{reactor\ agua}$  = peso del reactor lleno de agua (kg)

$M_{total}$  = peso del reactor vacío (kg)

$\rho_{agua}$  = densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

$V_{reactor}$  = volumen total del reactor (m<sup>3</sup>)

Peso de los reactores en operación:

El peso total del equipo en condiciones de operación lo forman el peso del equipo vacío, el peso del fluido refrigerante (agua) que circula por la carcasa, la mezcla que circula por los tubos (mezcla gaseosa) y la masa del catalizador que se encuentra dentro de los tubos calculada en este capítulo. Por lo tanto, se obtiene la siguiente manera de calcularlo:

$$\text{Ecuación 11.63 } M_{total,op} = M_{total} + \rho_{agua\ 190^{\circ}C} \cdot (V_c) + W_{cat} + \rho_{mezcla} \cdot (V_{tub} - V_{cat})$$

Dónde:

$M_{total,op}$  = peso total de los reactores en operación (kg)

$M_{total}$  = peso total de los reactores vacíos (kg)

$\rho_{agua\ 190^{\circ}C}$  = densidad del agua a 190°C ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$V_c$  = volumen de la carcasa ( $m^3$ )

$W_{cat}$  = cantidad de catalizador (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla gaseosa a 270°C ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$V_{tub}$  = volumen de tubos ( $m^3$ )

$V_{cat}$  = volumen de catalizador ( $m^3$ )

Sabiendo que la densidad del agua a 190°C es de 864,4 kg/m<sup>3</sup>, que la densidad de la mezcla gaseosa a 270°C es de 12,67 kg/m<sup>3</sup> y que la cantidad de catalizador a usar es de 18675 kg:

$$\begin{aligned} M_{total,op} &= 90787\text{ kg} + 864,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (35\text{m}^3) + 18675\text{ kg} + 12,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (24,90\text{m}^3 - 12,45\text{m}^3) \\ &= 139873,74\text{ kg} = 139,87\text{ tn} \end{aligned}$$

## 11.2 Diseño de las columnas de destilación

### 11.2.1 Tipos de columnas y su comparación

En primer lugar, se ha tenido que decidir si usar una columna de platos o empacada (en continuo) para los procesos de destilación. Uno de los factores principales que se han tenido en cuenta para la elección de usar columnas de rectificación de platos es el factor económico, debido a que los platos tienen un coste considerablemente inferior al empacado de las otras columnas. Otros motivos por los cuales se ha elegido este tipo de columna podrían ser:

- El mantenimiento e instalación de los platos son más sencillos que las de los rellenos.
- La limpieza ocasional es más sencilla para las torres de platos.
- Las torres de platos proporcionan una retención del líquido mayor.
- Suelen soportar mucho mejor las elevadas temperaturas de operación, llegando estas hasta 200 y 300°C.
- Como el flujo de líquido es inferior al del gas, es preferible trabajar con columnas de platos.
- Usar platos evita un posible taponamiento de la columna.

Así mismo, los diámetros de las columnas empacadas suelen ser inferiores a 1 m, cosa que en nuestro caso no es así ya que la mayoría de las torres tienen un diámetro de hasta 3 m, por lo que se ha decidido usar columnas de platos.

### 11.2.2 Condensador y reboiler

Los condensadores y reboilers de las columnas de destilación son dos de los elementos principales que permiten realizar la operación y el diseño de la destilación.

El reboiler es un equipo parecido a un intercambiador de calor que permite aportar la suficiente energía para poder separar los componentes de la mezcla de la alimentación formando una fase en estado vapor a partir de la fase líquida del fondo de la columna con un fluido que aporta calor al sistema, en este caso vapor de agua.

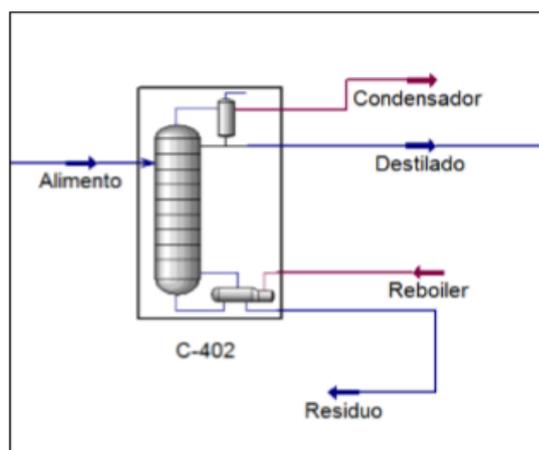
El condensador es otro tipo de intercambiador de calor que nos permite extraer energía de la fase vapor que sale por la cabeza de la columna para así poder condensarlo y producir un líquido que parte será introducido de nuevo en la columna como reflujo y parte se extraerá como producto destilado.

### 11.2.3 Columna de destilación C-400

A partir de una aproximación por el método Shortcut se procede a realizar el método riguroso de la columna de destilación C-400. Para la simulación en ASPEN HYSYS de dicho método es necesario poder definir el caudal de entrada de alimentación a partir del balance de materia realizado, el número y tipo de platos que se necesitarán y el plato en el que se introducirá el alimento. Así mismo, se necesitará definir la presión y temperatura de trabajo que dependerán de la zona (condensador o reboiler). También, se ha de tener en cuenta si se trata de un condensador total o parcial. En nuestro caso sea decidido simular el diseño con condensador total según nos indica la patente seguida, [3]. Por último, dos factores importantes para tener en cuenta son la relación de reflujo (reflux ratio) y el caudal de destilado.

#### 11.2.3.1 Diseño en Aspen Hysys

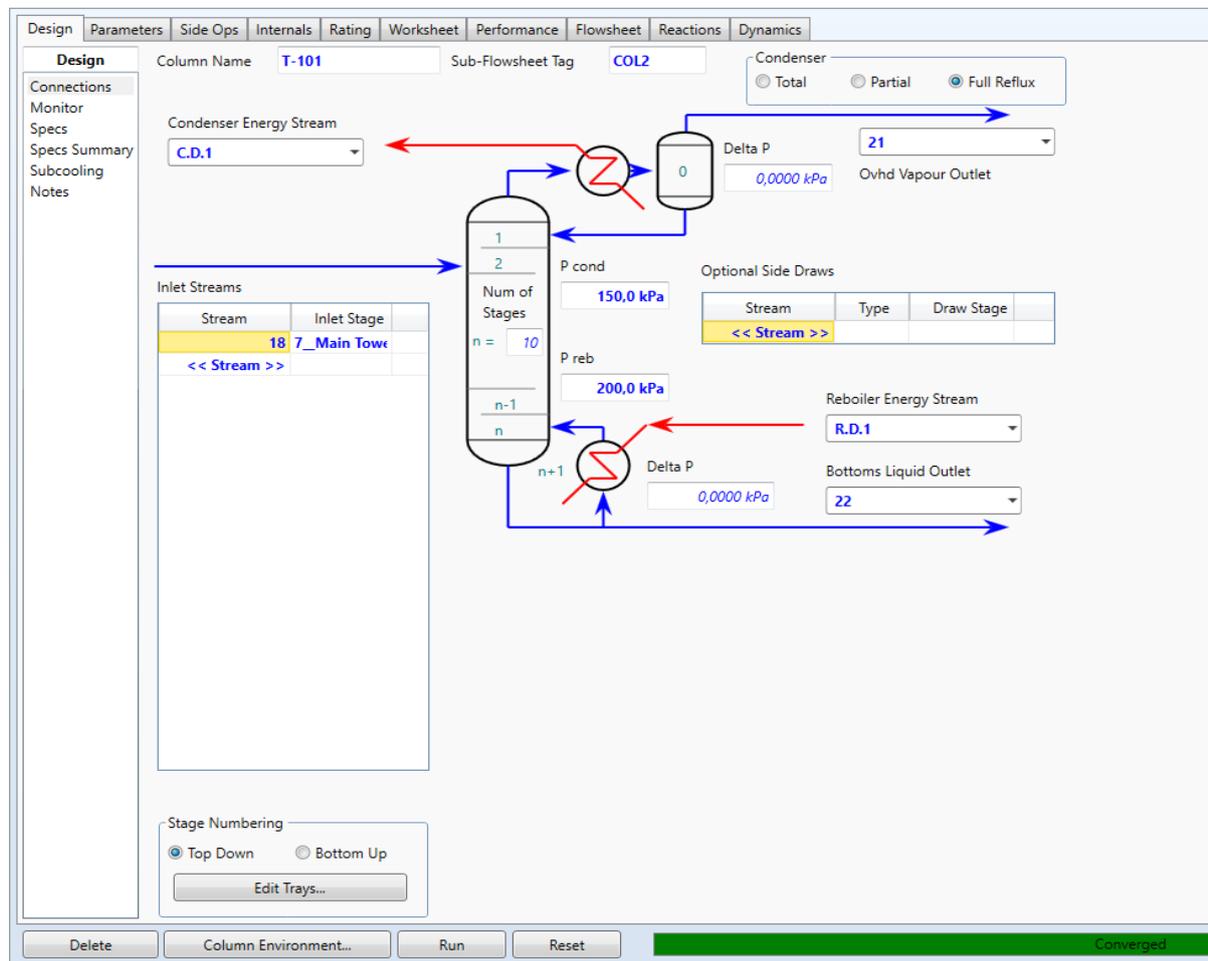
A continuación, se procederá al diseño de la columna C-400 mediante el programa Aspen Hysys, indicando primero en la **figura 11.18** el esquema básico de una columna de destilación en dicho programa:



**Figura 11.18.** Esquema básico de una columna de destilación en Aspen Hysys.

Tal y como se observa en la **figura 11.18**, al corriente que sale por cabeza de columna se le llama producto destilado, el corriente que sale por debajo de la columna será el residuo líquido y, por último, el corriente que entra a la columna será la alimentación y, ésta, entrará en la columna por una etapa en equilibrio en concreto, que más adelante se especificará.

En segundo lugar, en la **figura 11.19**, se pueden observar las condiciones iniciales de operación de la columna C-400, sabiendo que trabajará a una presión ligeramente superior a la atmosférica según indica la patente, [3]:



**Figura 11.19.** Condiciones de operación de la columna de destilación C-400 diseñada en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.19**, y según referencias encontradas, se ha decidido trabajar a una presión ligeramente superior a la atmosférica (entre 1,5 - 2 atm aproximadamente). Así mismo, se puede observar cómo se trabaja con un reflujo total de condensador, cosa que implica tener una relación de reflujo alta y que la mayoría de fluido condensado vuelva a ser introducido en la columna, obteniendo así, un caudal de gas por cabeza de torre no condensado en forma gas que será la que se introduzca en la siguiente operación de absorción.

Finalmente, se obtiene una columna de 10 etapas de equilibrio, donde la etapa en la que el alimento es introducido es la número 7, con el objetivo principal de separar el agua de los demás componentes más volátiles, entre ellos el óxido de etileno, para una reabsorción posterior con el propósito de aumentarla pureza del producto final.

A continuación, se indican en la **tabla 11.9** las condiciones de operación y las composiciones molares del corriente de alimentación, del destilado y del residuo:

**Tabla 11.9.** Balance de materia de las corrientes de alimentación, destilado y residuo de la columna C-400.

	Alimentación	Residuo	Destilado
Temperatura (°C)	90,3	120,2	41
Presión (kPa)	300	200	150
Caudal molar (kmol/h)	$3,08 \cdot 10^4$	$3,04 \cdot 10^4$	390,1
Caudal másico (kg/h)	$5,65 \cdot 10^5$	$5,48 \cdot 10^5$	$1,67 \cdot 10^4$
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	952,5	930,6	2,52
<b>Fracción molar</b>			
Agua (H <sub>2</sub> O)	0,988	1	0,0489
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0	0	0,0001
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0	0	0,0001
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	0,0119	0	0,9403
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,0001	0	0,0101
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0	0	0,0005
<b>Caudal molar (kmol/h)</b>			
Agua (H <sub>2</sub> O)	30441,869	30422,775	19,095
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0,027	0	0,027
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,036	0	0,036
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	366,832	0,011	366,82
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	3,926	0	3,926
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0,201	0	0,201

Tal y como se puede observar en la **tabla 11.9**, la alimentación parece que no contenga ni etileno ni oxígeno ni nitrógeno, pero esto no es cierto. El problema es que la cantidad que existe es tan ínfima que el programa considera la fracción molar prácticamente nula. Así mismo, el residuo contiene mayormente agua (objetivo principal), con una pequeña cantidad de óxido de etileno no destilado, corriente que será aprovechada como líquido absorbente en la siguiente torre de absorción.

Por otro lado, por el destilado sale casi en su totalidad el óxido de etileno (94%) junto a vapor de agua (4,89%) y con prácticamente la totalidad de los otros componentes que entraban a la columna, teniendo en cuenta que una gran parte será reintroducida en la columna debido al reflujo total.

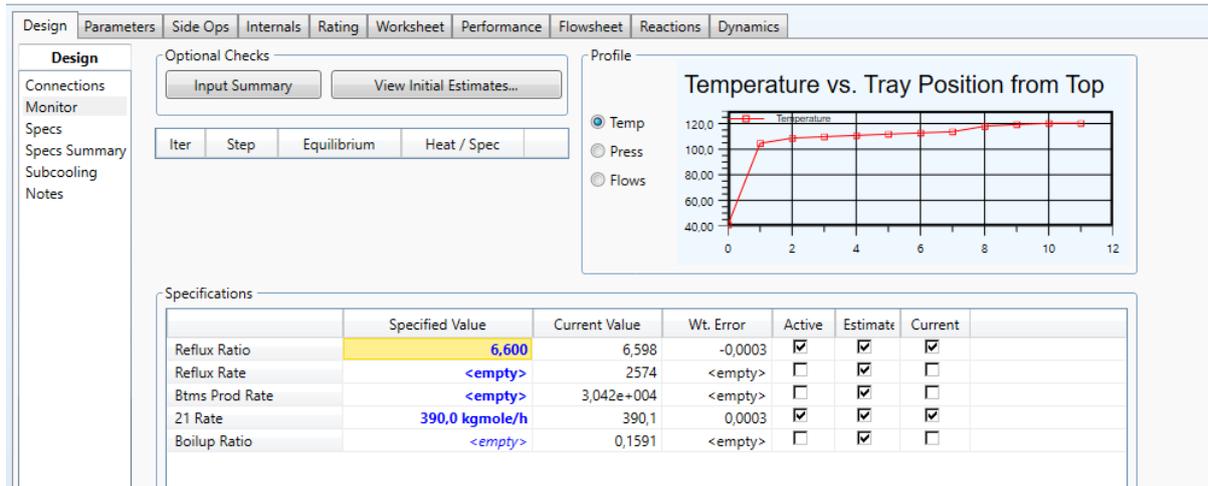


Figura 11.20. Relación de reflujo, caudal de destilado y caudal de residuo de la columna C-400.

Por último, y tal y como se puede observar en la **figura 11.20** anterior, se ha obtenido una relación de reflujo de 6,6, siendo estas óptimas hasta un valor de 18 pero, a la vez, claves en el coste final de la columna. Así mismo, el caudal de destilado gas que no es reintroducido a la torre pasa a ser de 390 kmol/h.

Una vez que se ha finalizado con el diseño mediante el simulador HYSYS, este también permite la obtención de diferentes representaciones gráficas que relacionan, por ejemplo, la temperatura en función del plato de equilibrio en que nos encontremos. Estos parámetros están representados en la **figura 11.21** siguiente:

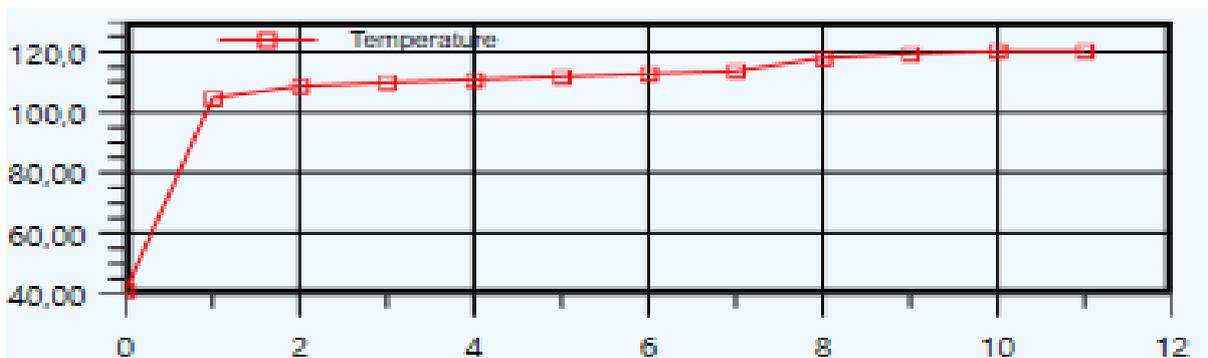


Figura 11.21. Representación gráfica de la temperatura de la torre en función del plato de la columna C-400.

### 11.2.3.2 Diseño mecánico

#### 11.2.3.2.1 Internals de la columna

En primer lugar, se detallarán los internals obtenidos mediante el programa Aspen Hysys de la columna C-400, dónde están incluidos diseño de platos, diámetro y altura de la columna o espaciado entre platos, entre otros.

Debido a las condiciones de operación de la columna mostradas anteriormente, se ha optado por utilizar un tipo de plato en concreto: plato perforado (Sieve). Se han elegido los platos perforados ya que su construcción es más sencilla, requiriendo la perforación de pequeños agujeros en la bandeja reduciendo considerablemente su coste final y, por ello, es uno de los más empleados en la industria actualmente.

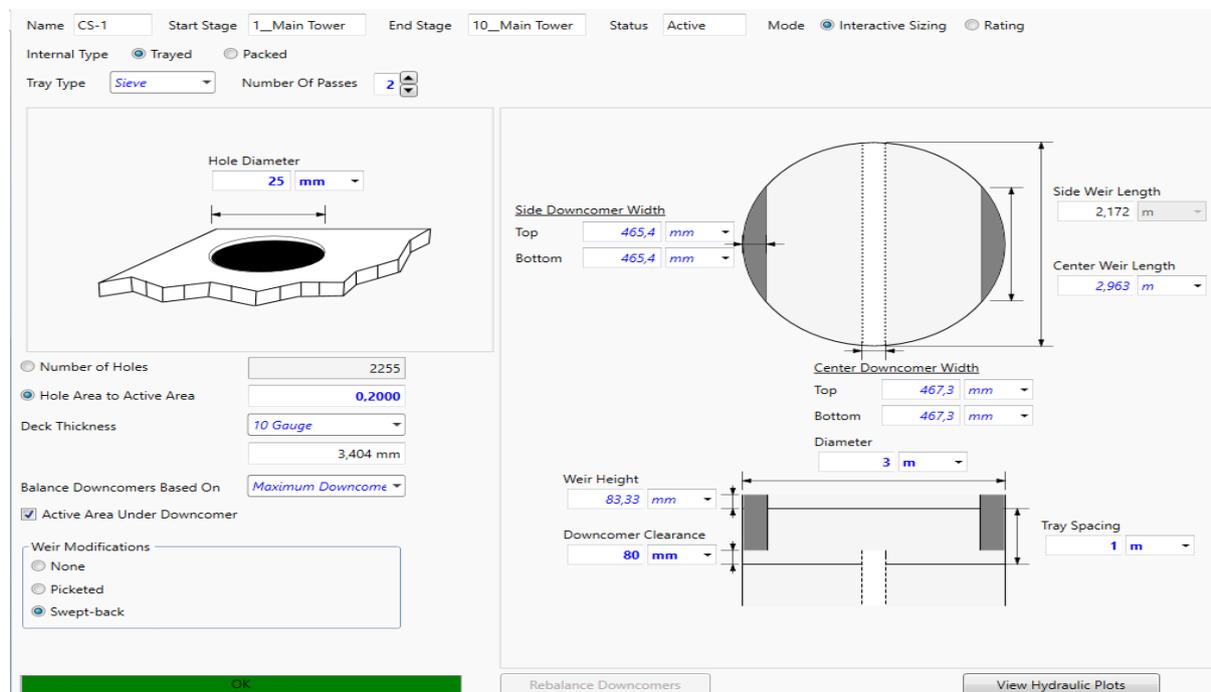


Figura 11.22. Características geométricas de los platos de la columna C-400 en Aspen Hysys.

Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Tower: Main Tower Selected Internals: Internals-1 Transport Properties Flows

**Column Internals Summary**

Number Of Stages	10
Total Height [m]	10,00
Total Head Loss [mm]	658,4
Total Pressure Drop [mbar]	60,42
Number Of Sections	1
Number Of Diameters	1
Pressure Drop Across Sump [kPa]	<empty>

**Sections Summary**

Section	Start	End	Diameter [m]	Height [m]	Internal Type	Tray or Packin Type	Section Pressure Drop [mbar]	Approach To Flood [%]	Limiting Stage
CS-1	1_Main Tower	10_Main Tower	3,000	10,00	Trayed	Sieve	60,42	109,57	10_Main Tower

Figura 11.23. Diseño mecánico (internals) de la columna C-400 en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.23**, se ha diseñado una columna de 10 m de altura y 3 m de diámetro interno, siendo la relación entre estas de 3,33, siendo óptima mientras esté en un rango entre 3 y 10 ( $H/D = 3 - 10$ ). Así mismo, se ha decidido que esta columna trabaje siempre a una misma sección en todas las etapas de equilibrio. Por otro lado, en la **figura 11.22**, se puede observar cómo se ha escogido platos perforados tipo Sieve con un diámetro de agujero de 25 mm y un número total de agujeros de 2255.

Por último, la siguiente **tabla 11.10** muestra los parámetros, como los resultados hidráulicos, geometría de la columna o características de los platos, del diseño obtenido para la columna de destilación C-400:

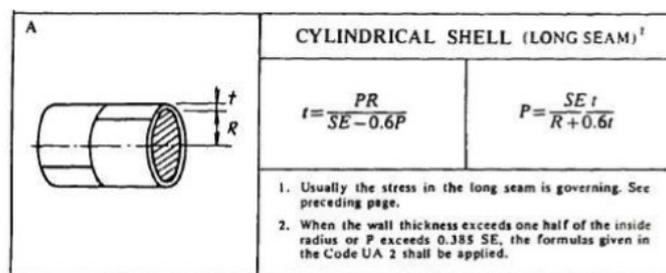
**Tabla 11.10.** Tabla de características y geometría de platos y parámetros hidráulicos de la columna C-400.

Geometría	
Diámetro (m)	3
Espaciado entre platos (m)	1
Altura (m)	10
Área transversal (m <sup>2</sup> )	7,07
Área activa (m <sup>2</sup> )	5,53
Características de los platos	
Tipo de plato	Perforado (Sieve)
Número de pasos del flujo	2
Método de inundación	Glitsch
Número de orificios	2255
Diámetro de orificios (mm)	25
Altura de vertedero (mm)	83,3
Parámetros hidráulicos	
Máxima pérdida de presión por plato (kPa)	0,8
Carga máxima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	134,1
Carga mínima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	4,47

### 11.2.3.2.2 Espesor de columna y cabezales

#### Espesor de columna:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá la columna de destilación C-400 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.24**:



**Figura 11.24.** Fórmulas para el cálculo del espesor de la columna de destilación C-400.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.64 } t_{C-400} = \frac{P_{C-400} \cdot R_{int,C-400}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{C-400}} + C_1 = \frac{1,97 \text{ atm} \cdot 1500 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,97 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 4,75 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{C-200}$  = espesor mínimo que tiene que tener la columna C – 400 (mm)

$P_{C-200}$  = presión de operación a la que trabaja la columna C – 400 (atm)

$R_{int,C-200}$  = radio interno de la columna C – 400 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

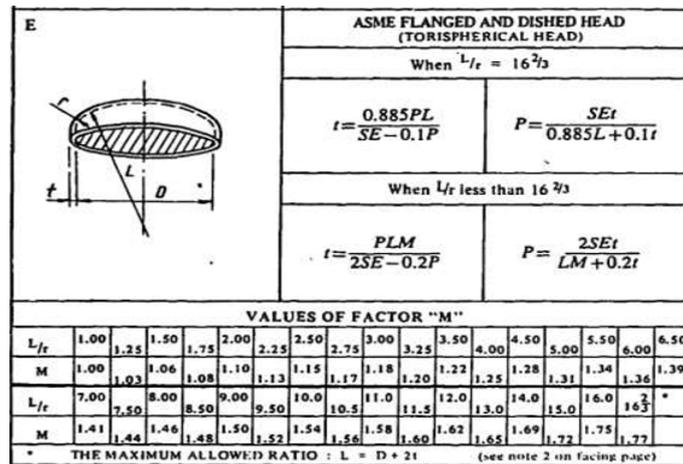
$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 120°C o 248°F y la presión de 200 kPa, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.64**, se ha obtenido un grosor de unos 4,75 mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 6 mm debido a los espesores estándar de chapa en Europa.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales de la columna de destilación C-400 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.25**:



**Figura 11.25.** Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales la columna de destilación C-400.

Dónde:

Si  $t_{C-400}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,C-200}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{C-400}/L = 6 \text{ mm}/3000 \text{ mm} \sim 0,002 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 3000 = 180 \text{ mm}$ ,  $L = 3000 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 3000 \text{ mm}/180 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.25**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

$$\text{Ecuación 11.65 } t_{cab,C-400} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 1,97 \text{ atm} \cdot 3000 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,1 \cdot 1,97 \text{ atm}} = 6,76 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$$t_{cab,C-400'} = 1,1 \cdot t_{cab,C-400} = 1,1 \cdot 6,76 \text{ mm} = 7,44 \text{ mm}$$

Por último, se escogerá un valor de espesor de los cabezales estándares, por lo que pasará a ser de 10mm y, como los valores del espesor de los cabezales y el de la columna son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 10mm.

### 11.2.3.2.3 Altura de columna y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real de la columna en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,C-400} - 0,455 \cdot t_{cab,C-400} = 0,1935 \cdot 3000mm - 0,455 \cdot 10mm = 575,95mm$$

$$\text{Ecuación 11.66 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,C-400} = 3,5 \cdot 10 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.67 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 35 \text{ mm} + 575,95mm = 610,95 \text{ mm} = 0,611 \text{ m}$$

Dónde:

$D_{int,C-400}$  = diámetro interno de la columna (mm)

$t_{cab,C-400}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,611 m, la altura real de la columna pasará a ser de 1 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.68 } H_{total,C-400} = H_{C-400} + 2 \cdot H_{cab,C-400} = 10 \text{ m} + 2 \cdot 0,611m = 11,22 \text{ m}$$

Dónde:

$H_{total,C-400}$  = altura total de la columna C – 400 (m)

$H_{C-400}$  = altura teórica de la columna C – 400 (m)

$H_{cab,C-400}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.2.3.3 Volumen y peso de la columna

#### 11.2.3.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos de la columna, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

#### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.69 } V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,C-400})^3 = 0,1 \cdot (3m)^3 = 2,7 m^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $m^3$ )

$D_{int,C-400}$  = diámetro interno de la columna (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.70 } V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,C-400})^3 = 0,1 \cdot (3,02m)^3 = 2,75 m^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $m^3$ )

$D_{ext,C-400}$  = diámetro externo de la columna (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.71 } V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 2,754 - 2,70 = 0,054 m^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $m^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $m^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $m^3$ )

Volumen de columna:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.72 } V_{int,C-400} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,C-400})^2 \cdot H_{total,C-400} = \frac{\pi}{4} \cdot (3)^2 \cdot 11,22m = 79,31 m^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-400} = \text{volumen interno de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{int,C-400} = \text{diámetro interno de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-400} = \text{altura total de la columna (m)}$$

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.73 } V_{ext,C-400} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,C-400})^2 \cdot H_{total,C-400} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,02)^2 \cdot 11,22m = 80,37 m^3$$

Dónde:

$$V_{ext,C-400} = \text{volumen externo de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{ext,C-400} = \text{diámetro externo de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-400} = \text{altura total de la columna (m)}$$

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de la columna será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.74 } V_{pared,C-400} = V_{ext,C-400} - V_{int,C-400} = 80,37 - 79,31 = 1,06 m^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-400} = \text{volumen interno de la columna (m}^3\text{)}$$

$$V_{ext,C-400} = \text{volumen externo de la columna (m}^3\text{)}$$

$$V_{pared,C-400} = \text{volumen de la pared de la columna (m}^3\text{)}$$

Por lo que, al final, el volumen total de la columna ocupada por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.75 } V_{pared columna} = V_{pared,C-400} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 1,06 m^3 + 2 \cdot 0,054 m^3 = 1,17 m^3$$

### 11.2.3.3.2 Peso de la columna

#### Peso de la columna vacía:

En este apartado se calculará el peso de la columna si ésta estuviera vacía de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener de la columna como los platos perforados. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de  $8000 \text{ kg/m}^3$ , **[1]**:

$$\text{Ecuación 11.76 } M_{C-400,vacia} = (V_{pared\ columna} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (1,17 \text{ m}^3 \cdot 8000 \text{ kg/m}^3) \cdot 1,1 = 10296 \text{ kg}$$

Dónde:

$M_{C-400,vacia}$  = peso de la columna vacía (kg)

$\rho_{acero\ 316L}$  = densidad del acero 316L ( $\text{kg/m}^3$ )

#### Peso de la columna en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso de la columna llena de agua, es necesario conocer el volumen total de la columna, que en este caso son  $79,31 \text{ m}^3$  de la columna más 2 veces el volumen del cabezal  $2,7 \text{ m}^3$ , dando un total de  $84,71 \text{ m}^3$ .

Por tanto, el peso de la columna llena de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.77 } M_{C-400,agua} = M_{C-400,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{agua} = 10296 \text{ kg} + 84,71 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 95006 \text{ kg} = 95 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-400,agua}$  = peso de la columna llena de agua (kg)

$\rho_{agua}$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

Peso de la columna en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada de la columna:

$$\text{Ecuación 11.78 } M_{C-400,op} = M_{C-400,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{mezcla} = 10296 \text{ kg} + 84,71 \text{ m}^3 \cdot 952,5 \text{ kg/m}^3 = 90982,27 \text{ kg} = 90,98 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-400,op}$  = peso de la columna con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\text{kg/m}^3$ )

11.2.3.4 Aislamiento de la columna

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en la zona de reboiler, como es nuestro caso 120°C, es necesario implementar un aislante, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.79 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{1/4}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{120^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{3,02 \text{ m} \cdot 100}\right)^{1/4}} = 11,13 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la columna (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la columna (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12 cm, [11], por lo que el grosor de 11,13 se aproximará a un grosor de 12 cm para unificar valores.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\text{Ecuación 11.80 } V_{aislante} = S_{ext,total} \cdot t_{aislante} = 123,43 \text{ m}^2 \cdot 0,12 \text{ m} = 14,81 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}} = \text{volumen del aislante (m}^3\text{)}$

$t_{\text{aislante}} = \text{espesor del aislante (m)}$

$$\textbf{Ecuación 11.81 } S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 106,45 \text{ m}^2 + 2 \cdot 8,49 \text{ m}^2 = 123,43 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.82 } S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 3,02 \text{ m} \cdot 11,22 \text{ m} = 106,45 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.83 } S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 3,02 \text{ m}^2 = 8,49 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}} = \text{sección externa de los cabezales (m}^2\text{)}$

$S_{\text{ext,c}} = \text{sección externa del cuerpo de la columna (m}^2\text{)}$

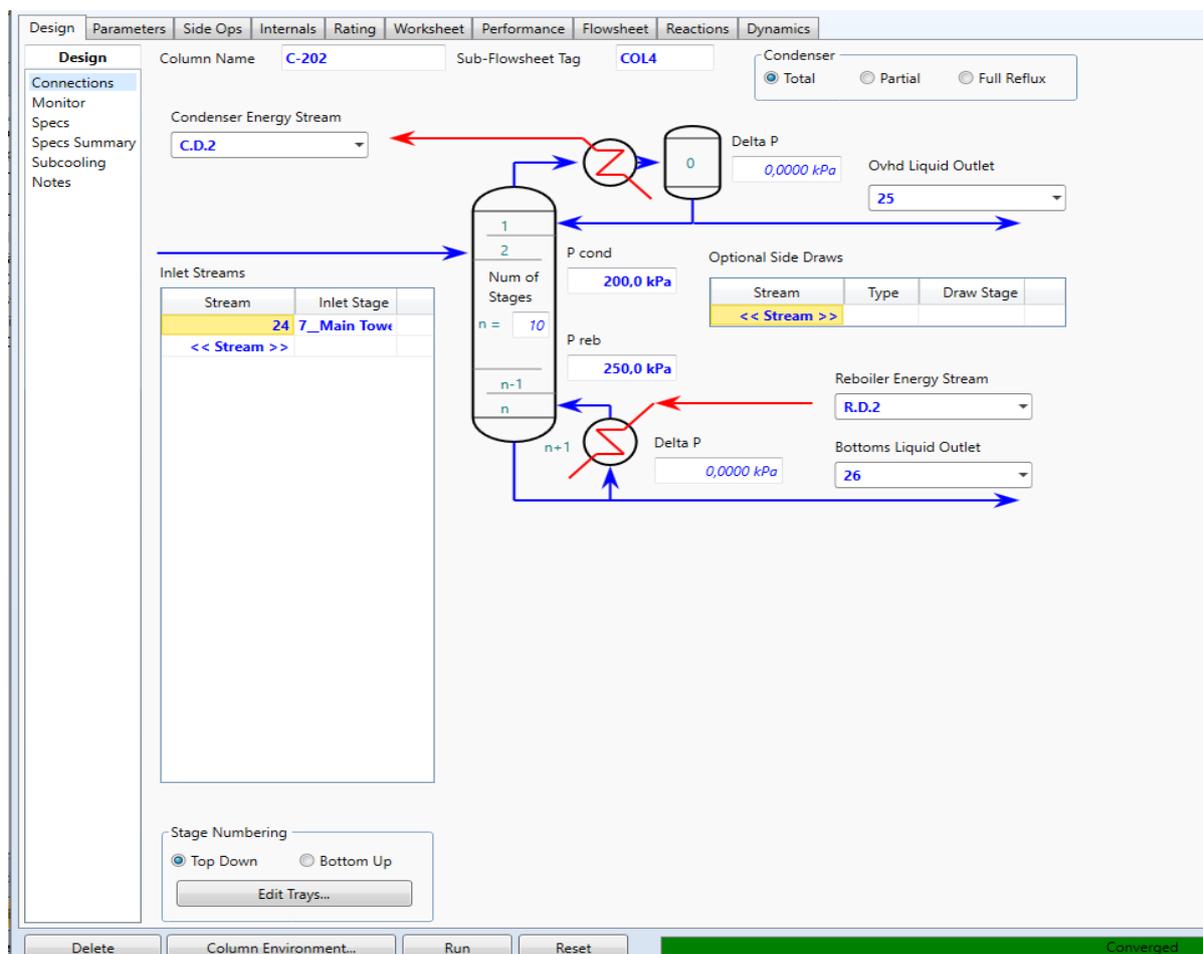
$S_{\text{ext,total}} = \text{sección externa de la columna (m}^2\text{)}$

### 11.2.4 Columna de destilación C-402

A partir de una aproximación por el método Shortcut se procede a realizar el método riguroso de la columna de destilación C-402. Para la simulación en ASPEN HYSYS de dicho método es necesario poder definir el caudal de entrada de alimentación a partir del balance de materia realizado, el número y tipo de platos que se necesitarán y el plato en el que se introducirá el alimento. Así mismo, se necesitará definir la presión y temperatura de trabajo que dependerán de la zona (condensador o reboiler). También, se ha de tener en cuenta si se trata de un condensador total o parcial. En nuestro caso sea decidido simular el diseño con condensador total según nos indica la patente seguida, [3]. Por último, dos factores importantes para tener en cuenta son la relación de reflujo (reflux ratio) y el caudal de destilado.

#### 11.2.4.1 Diseño en Aspen Hysys

En primer lugar, en la **figura 11.26**, se pueden observar las condiciones iniciales de operación de la columna C-402, sabiendo que trabajará a una presión ligeramente superior a la atmosférica según indica la patente, [3]:



**Figura 11.26.** Condiciones de operación de la columna de destilación C-402 diseñada en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.26**, y según referencias encontradas, se ha decidido trabajar a una presión ligeramente superior a la atmosférica (entre 2 – 2,5 atm aproximadamente). Así mismo, se puede observar cómo se trabaja con un condensador vertical total, a diferencia de la columna C-400, por lo que todo el caudal obtenido por cabeza de columna será producto condensado en forma líquida donde, una parte será reintroducida en la columna y otra será el caudal de producto que se obtendrá finalmente.

Al final, se obtiene una columna de 10 etapas de equilibrio, donde la etapa en la que el alimento es introducido es la número 7, con el objetivo principal de separar el agua de los demás componentes más volátiles, entre ellos y en mayoría el óxido de etileno, para el almacenamiento y venta posterior del mismo.

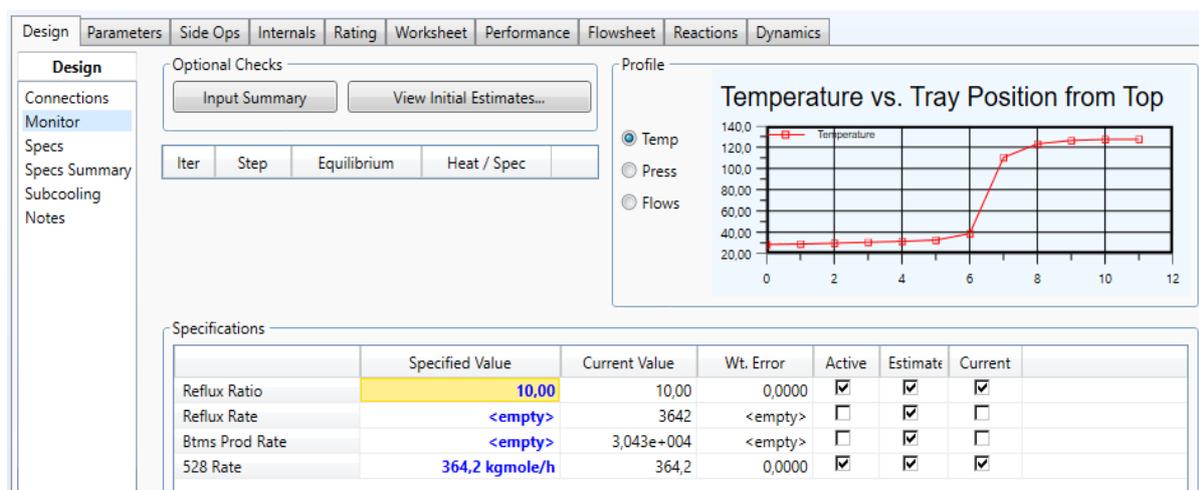
A continuación, se indican en la **tabla 11.11** las condiciones de operación y las composiciones molares del corriente de alimentación, del destilado y del residuo:

**Tabla 11.11.** Balance de materia de las corrientes de alimentación, destilado y residuo de la columna C-402.

	Alimentación	Residuo	Destilado
Temperatura (°C)	93,24	127,4	28,5
Presión (kPa)	250	250	200
Caudal molar (kmol/h)	$3,079 \cdot 10^4$	$3,043 \cdot 10^4$	364,2
Caudal másico (kg/h)	$5,642 \cdot 10^5$	$5,481 \cdot 10^5$	$1,604 \cdot 10^4$
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	950	924,2	859,3
Fracción molar			
Agua (H <sub>2</sub> O)	0,988	1	0
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0	0	0
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0	0	0
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	0,012	0	0,9997
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0	0	0,0002
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0	0	0
Caudal molar (kmol/h)			
Agua (H <sub>2</sub> O)	30426,842	30426,814	0,0286
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0	0	0
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,0001	0	0,0001
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	364,202	0,119	364,083
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,0886	0	0,0886
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0,0002	0	0,0002

Tal y como se puede observar en la **tabla 11.11**, la alimentación parece que no contenga ni etileno ni oxígeno ni nitrógeno, pero esto no es cierto. El problema es que la cantidad que existe es tan ínfima que el programa considera la fracción molar prácticamente nula. Así mismo, el residuo contiene aproximadamente el 100% de agua, con una pequeña cantidad de óxido de etileno no destilado pero que, posteriormente, será recirculado en el sistema.

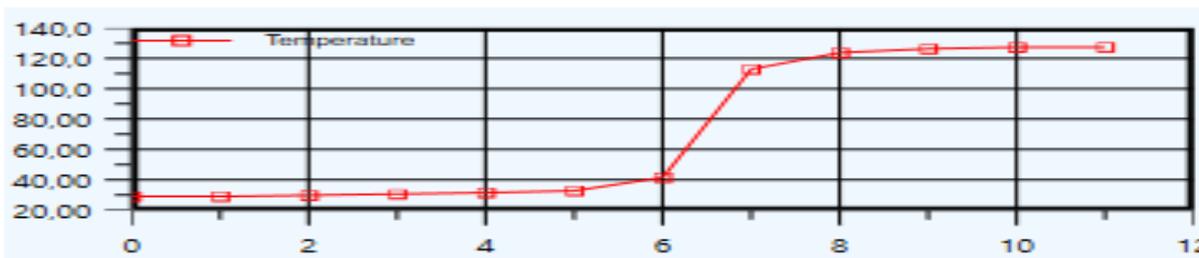
Por otro lado, por el destilado sale casi en su totalidad el óxido de etileno (99,97%) junto a fracciones ínfimas de vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno condensados y que juntas forman parte de las impurezas del producto final.



**Figura 11.27.** Relación de reflujo, caudal de destilado y caudal de residuo de la columna C-402.

Por último, y tal y como se puede observar en la **figura 11.27** anterior, se ha obtenido una relación de reflujo de 10, siendo estas óptimas hasta un valor de 18 pero, a la vez, claves en el coste final de la columna. Así mismo, la ratio de destilado de esta torre pasa a ser de 364,2 kmol/h, que resulta ser la producción final de óxido de etileno obtenido al 99,97% de pureza.

Una vez que se ha finalizado con el diseño mediante el simulador HYSYS, este también permite la obtención de diferentes representaciones gráficas que relacionan, por ejemplo, la temperatura y la presión en función del plato de equilibrio en que nos encontremos. Estos parámetros están representados en la **figura 11.28** siguiente:



**Figura 11.28.** Representación gráfica de la temperatura de la torre en función del plato de la columna C-402.

### 11.2.4.2 Diseño mecánico

#### 11.2.4.2.1 Internals de la columna

En primer lugar, se detallarán los internals obtenidos mediante el programa Aspen Hysys de la columna C-402, dónde están incluidos diseño de platos, diámetro y altura de la columna o espaciado entre platos, entre otros. Debido a las condiciones de operación de la columna mostradas anteriormente, se ha optado por utilizar un tipo de plato en concreto: plato perforado (sieve). Se han elegido los platos perforados ya que su construcción es más sencilla, requiriendo la perforación de pequeños agujeros en la bandeja reduciendo considerablemente su coste final y, por ello, es uno de los más empleados en la industria actualmente.

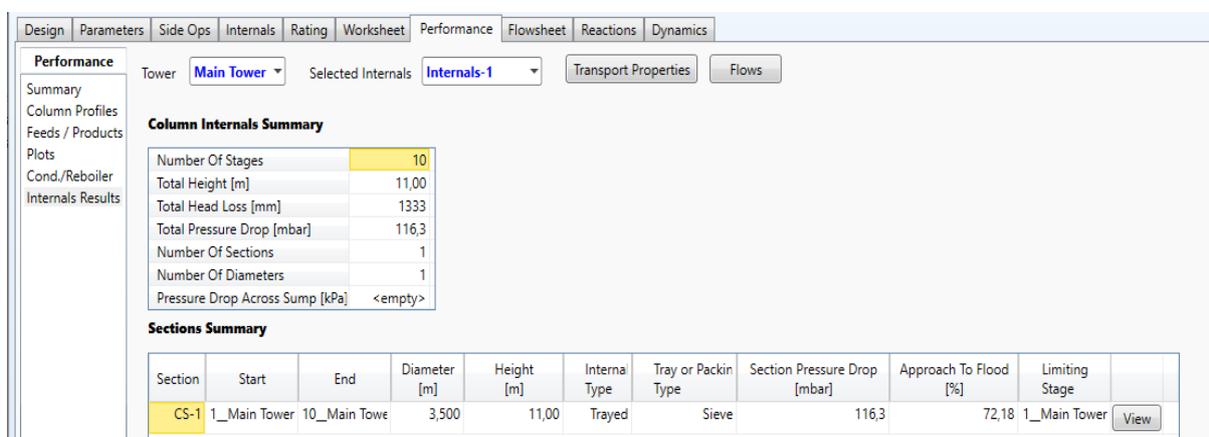


Figura 11.29. Diseño mecánico (internals) de la columna C-402 en Aspen Hysys.

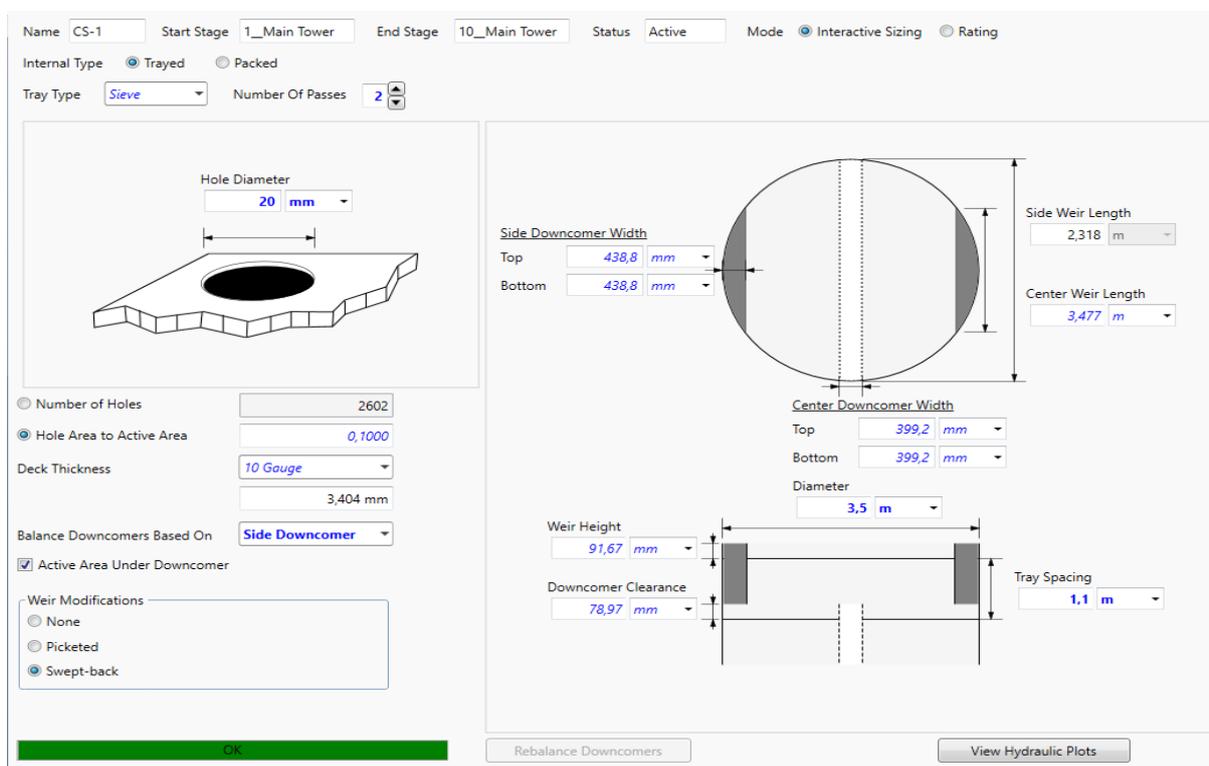


Figura 11.30. Características geométricas de los platos de la columna C-402 en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.29**, se ha diseñado una columna de 11 m de altura y 3,5 m de diámetro interno, siendo la relación entre estas de 3,14, siendo óptima mientras esté en un rango entre 3 y 10 ( $H/D = 3 - 10$ ). Así mismo, se ha decidido que esta columna trabaje siempre a una misma sección en todas las etapas de equilibrio. Por otro lado, en la **figura 11.30**, se puede observar cómo se ha escogido platos perforados tipo Sieve con un diámetro de agujero de 20 mm y un número total de agujeros de 2602.

Por último, la siguiente **tabla 11.12** muestra los parámetros, como los resultados hidráulicos, geometría de la columna o características de los platos, del diseño obtenido para la columna de destilación C-402:

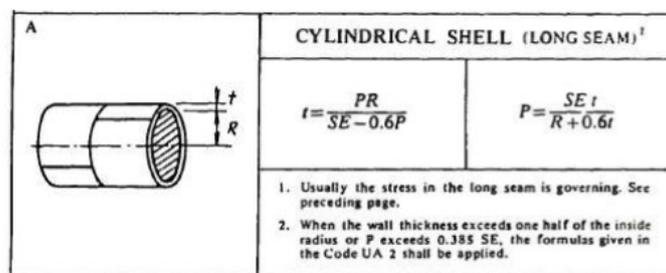
**Tabla 11.12.** Tabla de características y geometría de platos y parámetros hidráulicos de la columna C-402.

Geometría	
Diámetro (m)	3,5
Espaciado entre platos (m)	1,1
Altura (m)	11
Área transversal (m <sup>2</sup> )	9,62
Área activa (m <sup>2</sup> )	8,17
Características de los platos	
Tipo de plato	Perforado (Sieve)
Número de pasos del flujo	2
Método de inundación	Glitsch
Número de orificios	2602
Diámetro de orificios (mm)	20
Altura de vertedero (mm)	91,7
Parámetros hidráulicos	
Máxima pérdida de presión por plato (kPa)	1,3
Carga máxima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	134,1
Carga mínima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	4,47

#### 11.2.4.2.2 Espesor de columna y cabezales

##### Espesor de columna:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá la columna de destilación C-402 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.31**:



**Figura 11.31.** Fórmulas para el cálculo del espesor de la columna de destilación C-402.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.84 } t_{C-402} = \frac{P_{C-402} \cdot R_{int,C-402}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{C-402}} + C_1 = \frac{2,47 \text{ atm} \cdot 1750 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} - 0,85 - 0,6 \cdot 2,47 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 6,27 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{C-402}$  = espesor mínimo que tiene que tener la columna C – 402 (mm)

$P_{C-402}$  = presión de operación a la que trabaja la columna C – 402 (atm)

$R_{int,C-402}$  = radio interno de la columna C – 402 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

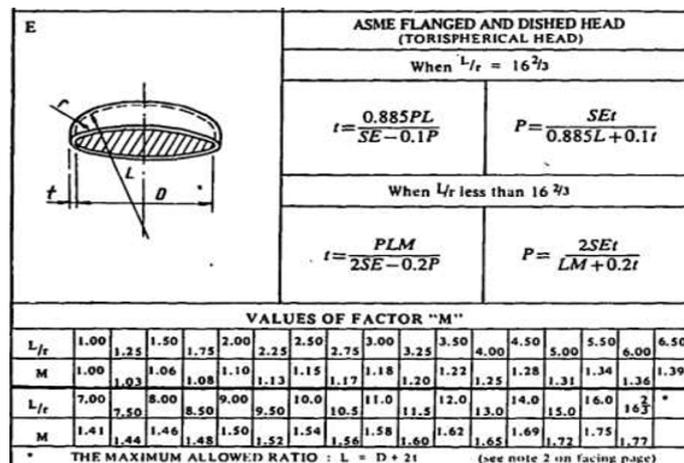
$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 127,4°C o 260,6°F y la presión de 250 kPa, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.84**, se ha obtenido un grosor de unos 6,27 mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 8mm.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales de la columna de destilación C-402 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.32**:



**Figura 11.32.** Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales la columna de destilación C-402.

Dónde:

Si  $t_{C-402}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,C-402}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{C-402}/L = 8 \text{ mm}/3500 \text{ mm} \sim 0,0023 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 3500 = 210 \text{ mm}$ ,  $L = 3500 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 3500 \text{ mm}/210 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.32**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

**Ecuación 11.85**  $t_{cab,C-402} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 2,47 \text{ atm} \cdot 3500 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,1 \cdot 2,47 \text{ atm}} = 8,43 \text{ mm}$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$t_{cab,C-402'} = 1,1 \cdot t_{cab,C-402} = 1,1 \cdot 8,43 \text{ mm} = 9,27 \text{ mm}$

Por último, se escogerá un valor de espesor de los cabezales estándares, por lo que pasará a ser de 10mm y, como los valores del espesor de los cabezales y el de la columna son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 10mm.

#### 11.2.4.2.3 Altura de columna y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real de la columna en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,C-402} - 0,455 \cdot t_{cab,C-402} = 0,1935 \cdot 3500mm - 0,455 \cdot 10mm = 672,7mm$$

$$\text{Ecuación 11.86 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,C-402} = 3,5 \cdot 10 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.87 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 35 \text{ mm} + 672,7mm = 707,7 \text{ mm} = 0,708 \text{ m}$$

Dónde:

$D_{int,C-402}$  = diámetro interno de la columna (mm)

$t_{cab,C-402}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,708 m, la altura real de la columna pasará a ser de 12,4 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.88 } H_{total,C-402} = H_{C-402} + 2 \cdot H_{cab,C-402} = 11 \text{ m} + 2 \cdot 0,708m = 12,40 \text{ m}$$

Dónde:

$H_{total,C-402}$  = altura total de la columna C – 402 (m)

$H_{C-402}$  = altura teórica de la columna C – 402 (m)

$H_{cab,C-402}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.2.4.3 Volumen y peso de la columna

#### 11.2.4.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos de la columna, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

#### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.89 } V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,C-402})^3 = 0,1 \cdot (3,5m)^3 = 4,29 m^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $m^3$ )

$D_{int,C-402}$  = diámetro interno de la columna (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.90 } V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,C-402})^3 = 0,1 \cdot (3,52m)^3 = 4,36 m^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $m^3$ )

$D_{ext,C-402}$  = diámetro externo de la columna (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.91 } V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 4,36 - 4,29 = 0,07 m^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $m^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $m^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $m^3$ )

Volumen de columna:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.92 } V_{int,C-402} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,C-402})^2 \cdot H_{total,C-402} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,5)^2 \cdot 12,40m = 119,30 m^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-402} = \text{volumen interno de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{int,C-402} = \text{diámetro interno de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-402} = \text{altura total de la columna (m)}$$

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.93 } V_{ext,C-402} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,C-402})^2 \cdot H_{total,C-402} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,52)^2 \cdot 12,40m = 120,67 m^3$$

Dónde:

$$V_{ext,C-402} = \text{volumen externo de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{ext,C-402} = \text{diámetro externo de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-402} = \text{altura total de la columna (m)}$$

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de la columna será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.94 } V_{pared,C-402} = V_{ext,C-402} - V_{int,C-402} = 120,67 - 119,30 = 1,37 m^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-402} = \text{volumen interno de la columna (m}^3\text{)}$$

$$V_{ext,C-402} = \text{volumen externo de la columna (m}^3\text{)}$$

$$V_{pared,C-402} = \text{volumen de la pared de la columna (m}^3\text{)}$$

Por lo que, al final, el volumen total de la columna ocupada por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.95 } V_{pared columna} = V_{pared,C-402} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 1,37 m^3 + 2 \cdot 0,07 m^3 = 1,51 m^3$$

#### 11.2.4.3.2 Peso de columna

##### Peso de la columna vacía:

En este apartado se calculará el peso de la columna si ésta estuviera vacía de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener de la columna como los platos perforados. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de 8000 kg/m<sup>3</sup>, **[18]** y **[8]**:

$$\text{Ecuación 11.96 } M_{C-402,vacia} = (V_{pared\ columna} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (1,51\ m^3 \cdot 8000\ kg/m^3) \cdot 1,1 = 13282\ kg$$

Dónde:

$M_{C-402,vacia}$  = peso de la columna vacía (kg)

$\rho_{acero\ 316L}$  = densidad del acero 316L (kg/m<sup>3</sup>)

##### Peso de la columna en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso de la columna llena de agua, es necesario conocer el volumen total de la columna, que en este caso son 119,3 m<sup>3</sup> de la columna más 2 veces el volumen del cabezal 4,29 m<sup>3</sup>, dando un total de 127,88 m<sup>3</sup>.

Por tanto, el peso de la columna llena de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.97 } M_{C-402,agua} = M_{C-402,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{agua} = 13282\ kg + 127,88\ m^3 \cdot 1000\ kg/m^3 = 141162\ kg = 141,16\ tn$$

Dónde:

$M_{C-402,agua}$  = peso de la columna llena de agua (kg)

$\rho_{agua}$  = densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

Peso de la columna en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada de la columna:

$$\text{Ecuación 11.98 } M_{C-402,op} = M_{C-402,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{mezcla} = 13282 \text{ kg} + 127,88 \text{ m}^3 \cdot 952,5 \text{ kg/m}^3 = 135087,7 \text{ kg} = 135,09 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-402,op}$  = peso de la columna con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\text{kg/m}^3$ )

11.2.4.4 Aislamiento de la columna

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en la zona del reboiler, como es nuestro caso 127°C aproximadamente, es necesario implementar un aislante que recubra la columna, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.99 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{\frac{1}{4}}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{127^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{3,52 \text{ m} \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 11,36 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la columna (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la columna (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12 cm, [11], por lo que el grosor de 11,36 cm se aproximará a un grosor de 12 cm para unificar valores estándar hoy en día en la industria.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\textbf{Ecuación 11.100} \quad V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 144,7 \text{ m}^2 \cdot 0,12 \text{ m} = 17,36 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante ( $\text{m}^3$ )

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\textbf{Ecuación 11.101} \quad S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 121,64 \text{ m}^2 + 2 \cdot 11,53 \text{ m}^2 = 144,7 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.102} \quad S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 3,52 \text{ m} \cdot 11 \text{ m} = 121,64 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.103} \quad S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 3,52 \text{ m}^2 = 11,53 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales de la columna ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,c}}$  = sección externa del cuerpo de la columna ( $\text{m}^2$ )

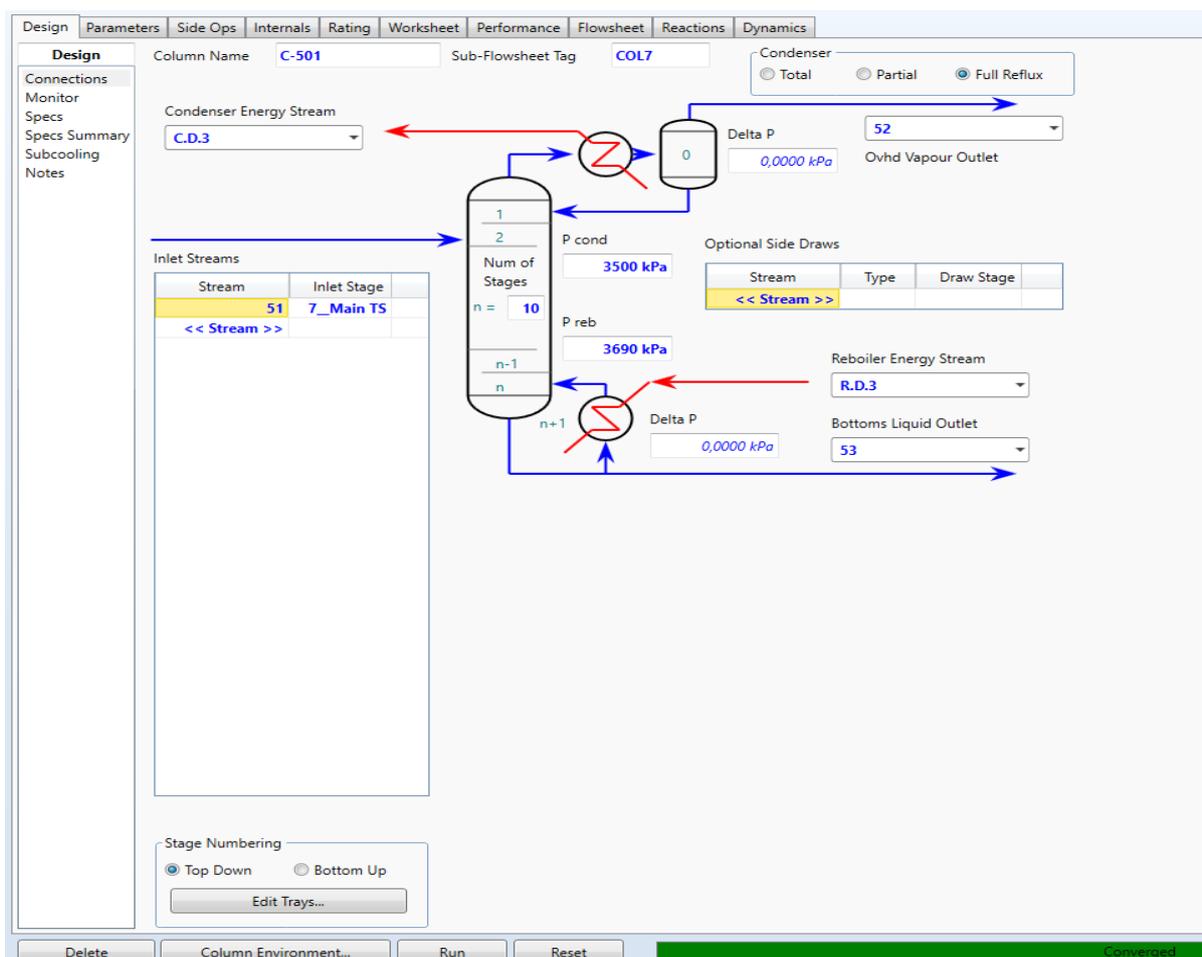
$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa de la columna ( $\text{m}^2$ )

### 11.2.5 Columna de destilación C-501

A partir de una aproximación por el método Shortcut se procede a realizar el método riguroso de la columna de destilación C-501. Para la simulación en ASPEN HYSYS de dicho método es necesario poder definir el caudal de entrada de alimentación a partir del balance de materia realizado, el número y tipo de platos que se necesitarán y el plato en el que se introducirá el alimento. Así mismo, se necesitará definir la presión y temperatura de trabajo que dependerán de la zona (condensador o reboiler). También, se ha de tener en cuenta si se trata de un condensador total o parcial. En nuestro caso sea decidido simular el diseño con condensador total según nos indica la patente seguida, [3]. Por último, dos factores importantes para tener en cuenta son la relación de reflujo (reflux ratio) y el caudal de destilado.

#### 11.2.5.1 Diseño en Aspen Hysys

En primer lugar, en la **figura 11.33**, se pueden observar las condiciones iniciales de operación de la columna C-501, sabiendo que trabajará a una presión superior a la atmosférica según indica la patente, [3]:



**Figura 11.33.** Condiciones de operación de la columna de destilación C-501 diseñada en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.33**, y según referencias encontradas, se ha decidido trabajar a una presión bastante superior a la atmosférica (entre 35 – 37 atm aproximadamente). Así mismo, se puede observar cómo se trabaja con un condensador vertical de reflujo total, una parte será reintroducida en la columna y otra será el caudal gas de producto que se obtendrá finalmente de CO<sub>2</sub> con una pureza del 99,66%.

Al final, se obtiene una columna de 10 etapas de equilibrio, donde la etapa en la que el alimento es introducido es la número 7, con el objetivo principal de separar el agua de los demás componentes más volátiles, entre ellos y en mayoría el dióxido de carbono.

A continuación, se indican en la **tabla 11.13** las condiciones de operación y las composiciones molares del corriente de alimentación, del destilado y del residuo:

**Tabla 11.13.** Balance de materia de las corrientes de alimentación, destilado y residuo de la columna C-501.

	Alimentación	Residuo	Destilado
Temperatura (°C)	62,6	250,7	-86,23
Presión (kPa)	4000	3690	3500
Caudal molar (kmol/h)	1,645·10 <sup>4</sup>	1,633·10 <sup>4</sup>	112,8
Caudal másico (kg/h)	3,717·10 <sup>5</sup>	3,667·10 <sup>5</sup>	4958
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1005	807,1	--
<b>Fracción molar</b>			
Agua (H <sub>2</sub> O)	0,891	0,897	0
Metilamina (C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO)	0,102	0,103	0
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0	0	0,0024
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0	0	0,0001
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	0,001	0,001	0,0001
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,069	0	0,9966
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0	0	0,0008
<b>Caudal molar (kmol/h)</b>			
Agua (H <sub>2</sub> O)	14652,495	14652,495	0
Metilamina (C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO)	1680,287	1680,287	0
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0,2758	0	0,2758
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,0163	0	0,0163
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	1,509	1,499	0,0098
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	112,978	0,566	112,41
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0,0856	0	0,0856

Tal y como se puede observar en la **tabla 11.13**, la alimentación parece que no contenga ni etileno ni oxígeno ni nitrógeno, pero esto no es cierto. El problema es que la cantidad que existe es tan ínfima que el programa considera la fracción molar prácticamente nula. Así mismo, el residuo contiene aproximadamente el 100% del agua y de la metilamina, con una pequeña cantidad de óxido de etileno y dióxido de carbono no destilados pero que, posteriormente, serán recirculado en el sistema en la absorción C-500.

Por otro lado, por el destilado sale casi en su totalidad el dióxido de carbono (99,66%) junto a fracciones ínfimas de vapor de agua, etileno y nitrógeno gas y que juntos forman parte de las impurezas del CO<sub>2</sub> final a purgar.

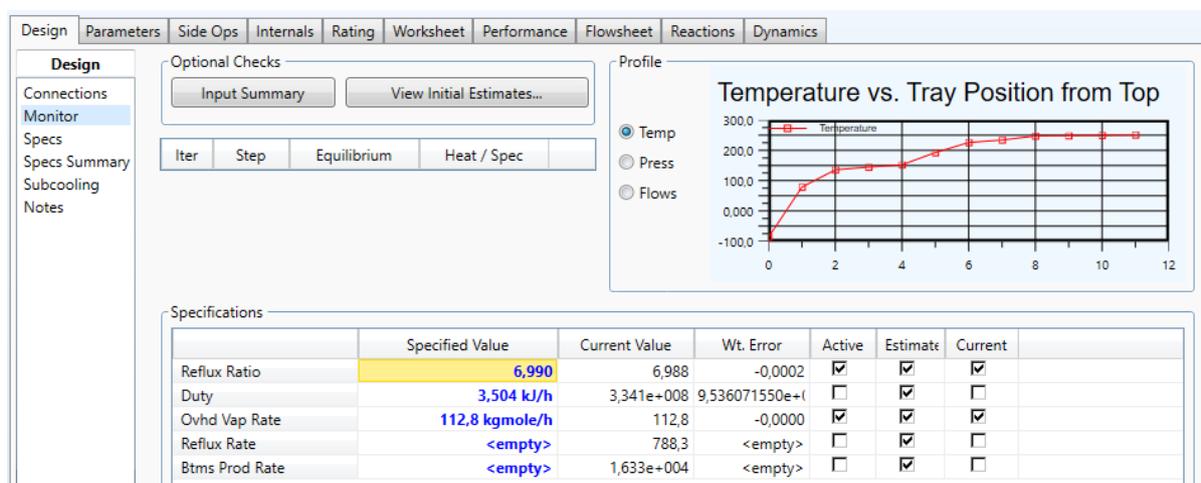


Figura 11.34. Relación de reflujo, caudal de destilado y caudal de residuo de la columna C-501.

Por último, y tal y como se puede observar en la **figura 11.34** anterior, se ha obtenido una relación de reflujo de 6,99, siendo estas óptimas hasta un valor de 18 pero, a la vez, claves en el coste final de la columna. Así mismo, la ratio de destilado de esta torre pasa a ser de 112,8 kmol/h, que resulta ser el corriente final para tratar de dióxido de carbono obtenido al 99,66% de pureza.

Una vez que se ha finalizado con el diseño mediante el simulador HYSYS, este también permite la obtención de diferentes representaciones gráficas que relacionan, por ejemplo, la temperatura y la presión en función del plato de equilibrio en que nos encontremos. Estos parámetros están representados en las **figuras 11.35** siguiente:

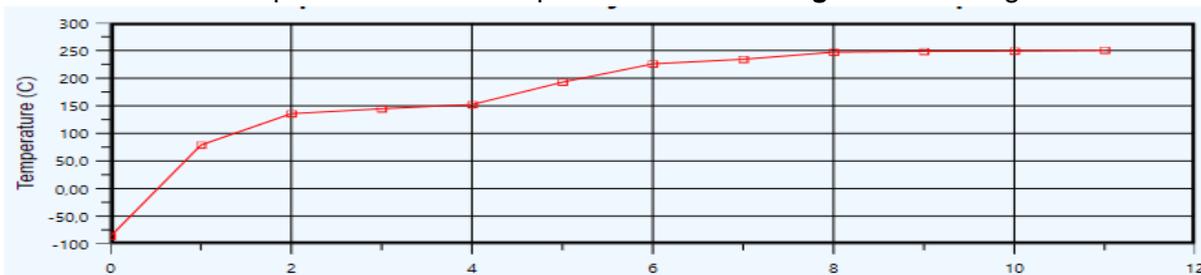


Figura 11.35. Representación gráfica de la temperatura de la torre en función del plato de la columna C-501.

### 11.2.5.2 Diseño mecánico

#### 11.2.5.2.1 Internals de la columna

En primer lugar, se detallarán los internals obtenidos mediante el programa Aspen Hysys de la columna C-501, dónde están incluidos diseño de platos, diámetro y altura de la columna o espaciado entre platos, entre otros. Debido a las condiciones de operación de la columna mostradas anteriormente, se ha optado por utilizar un tipo de plato diferente a los usados hasta ahora: plato tipo Bubble Cap.

**Column Internals Summary**

Number Of Stages	10
Total Height [m]	10,00
Total Head Loss [mm]	1638
Total Pressure Drop [mbar]	123,8
Number Of Sections	1
Number Of Diameters	1
Pressure Drop Across Sump [kPa]	<empty>

**Sections Summary**

Section	Start	End	Diameter [m]	Height [m]	Internal Type	Tray or Packin Type	Section Pressure Drop [mbar]	Approach To Flood [%]	Limiting Stage
CS-1	1_Main TS	10_Main TS	3,000	10,00	Trayed	Bubble Cap	123,8	81,74	<empty>

Figura 11.36. Diseño mecánico (internals) de la columna C-501 en Aspen Hysys.

Name: CS-1 | Start Stage: 1\_Main TS | End Stage: 10\_Main TS | Status: Active | Mode: Interactive Sizing

Internal Type:  Trayed |  Packed

Tray Type: **Bubble Cap** | Number Of Passes: 2

Cap Diameter: 3 in (76.2 mm) | Skirt Height: 1.0 in (25.4 mm)

Number Of Caps: 281 | Number Of Caps Per Active Area: 50,00

Deck Thickness: 10 Gauge | 3,404 mm

Balance Downcomers Based On: Maximum Downcome

Active Area Under Downcomer

Weir Modifications:  None |  Picketed |  Swept-back

Side Downcomer Width: Top 477,4 mm | Bottom 477,4 mm

Side Weir Length: 2,195 m

Center Weir Length: 2,961 m

Center Downcomer Width: Top 485,1 mm | Bottom 485,1 mm

Diameter: 3 m

Weir Height: 90 mm

Downcomer Clearance: 90 mm

Tray Spacing: 1 m

Figura 11.37. Características geométricas de los platos de la columna C-501 en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.36**, se ha diseñado una columna de 10 m de altura y 3 m de diámetro interno, siendo la relación entre estas de 3,33, siendo óptima mientras esté en un rango entre 3 y 10 ( $H/D = 3 - 10$ ). Así mismo, se ha decidido que esta columna trabaje siempre a una misma sección en todas las etapas de equilibrio. Por otro lado, en la **figura 11.37**, se puede observar cómo se ha escogido platos perforados tipo Bubble Cap con un diámetro de plato de 76,2 mm y un número total de 281.

Por último, la siguiente **tabla 11.14** muestra los parámetros, como los resultados hidráulicos, geometría de la columna o características de los platos, del diseño obtenido para la columna de destilación C-501:

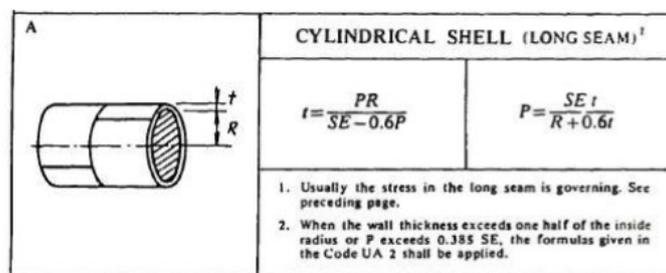
**Tabla 11.14.** Tabla de características y geometría de platos y parámetros hidráulicos de la columna C-501.

Geometría	
Diámetro (m)	3
Espaciado entre platos (m)	1
Altura (m)	10
Área transversal (m <sup>2</sup> )	7,07
Área activa (m <sup>2</sup> )	5,43
Características de los platos	
Tipo de plato	Bubble Cap
Número de pasos del flujo	2
Método de inundación	Glitsch
Número de Bubble Cap	281
Diámetro de Cap (mm)	76,2
Altura de vertedero (mm)	90
Parámetros hidráulicos	
Máxima pérdida de presión por plato (kPa)	1,8
Carga máxima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	134,1
Carga mínima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	2,5

### 11.2.5.2.2 Espesor de columna y cabezales

#### Espesor de columna:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá la columna de destilación C-501 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.38**:



**Figura 11.38.** Fórmulas para el cálculo del espesor de la columna de destilación C-501.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.104 } t_{C-501} = \frac{P_{C-501} \cdot R_{int,C-501}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{C-501}} + C_1 = \frac{35 \text{ atm} \cdot 1500 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 35 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 59,2 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{C-501}$  = espesor mínimo que tiene que tener la columna C – 501 (mm)

$P_{C-501}$  = presión de operación a la que trabaja la columna C – 501 (atm)

$R_{int,C-501}$  = radio interno de la columna C – 501 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

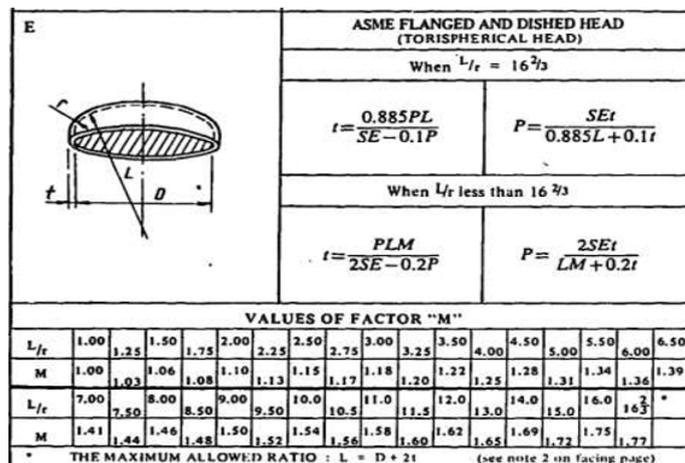
$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 62,5°C o 144,5°F y la presión de 3500 kPa, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.104**, se ha obtenido un grosor de unos 59,2 mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 60mm.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales de la columna de destilación C-501 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.39**:



**Figura 11.39.** Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales la columna de destilación C-501.

Dónde:

Si  $t_{C-501}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,C-501}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{C-501}/L = 60 \text{ mm}/3000 \text{ mm} \sim 0,02 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 3000 = 180 \text{ mm}$ ,  $L = 3000 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 3000 \text{ mm}/180 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.39**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

**Ecuación 11.105**  $t_{cab,C-501} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{SE - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 35 \text{ atm} \cdot 3000 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} - 0,1 \cdot 35 \text{ atm}} = 102,7 \text{ mm}$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$t_{cab,C-501'} = 1,1 \cdot t_{cab,C-501} = 1,1 \cdot 102,7 \text{ mm} = 104,5 \text{ mm}$

Por último, se escogerá un valor de espesor de los cabezales estándares, por lo que pasará a ser de 105mm y, como los valores del espesor de los cabezales y el de la columna son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 105mm.

### 11.2.5.2.3 Altura de columna y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real de la columna en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,C-501} - 0,455 \cdot t_{cab,C-501} = 0,1935 \cdot 3000mm - 0,455 \cdot 105mm = 532,7mm$$

$$\text{Ecuación 11.106 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,C-501} = 3,5 \cdot 105 mm = 367,5 mm$$

$$\text{Ecuación 11.107 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 367,5 mm + 532,7mm = 900,2 mm = 0,900 m$$

Dónde:

$D_{int,C-501}$  = diámetro interno de la columna (mm)

$t_{cab,C-501}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,900 m, la altura real de la columna pasará a ser de 11,8 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.108 } H_{total,C-501} = H_{C-501} + 2 \cdot H_{cab,C-501} = 10 m + 2 \cdot 0,900m = 11,8 m$$

Dónde:

$H_{total,C-501}$  = altura total de la columna C – 501 (m)

$H_{C-501}$  = altura teórica de la columna C – 501 (m)

$H_{cab,C-501}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.2.5.3 Volumen y peso de la columna

#### 11.2.5.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos de la columna, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

#### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\textbf{Ecuación 11.109 } V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,C-501})^3 = 0,1 \cdot (3,0m)^3 = 2,70 m^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $m^3$ )

$D_{int,C-501}$  = diámetro interno de la columna (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\textbf{Ecuación 11.110 } V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,C-501})^3 = 0,1 \cdot (3,21m)^3 = 3,30 m^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $m^3$ )

$D_{ext,C-501}$  = diámetro externo de la columna (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\textbf{Ecuación 11.111 } V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 3,30 - 2,70 = 0,60 m^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $m^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $m^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $m^3$ )

Volumen de columna:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.112 } V_{int,C-501} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,C-501})^2 \cdot H_{total,C-501} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,0)^2 \cdot 11,80m = 83,41 m^3$$

Dónde:

$V_{int,C-501}$  = volumen interno de la columna ( $m^3$ )

$D_{int,C-501}$  = diámetro interno de la columna (m)

$H_{total,C-501}$  = altura total de la columna (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.113 } V_{ext,C-501} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,C-501})^2 \cdot H_{total,C-501} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,21)^2 \cdot 11,80m = 95,49 m^3$$

Dónde:

$V_{ext,C-501}$  = volumen externo de la columna ( $m^3$ )

$D_{ext,C-501}$  = diámetro externo de la columna (m)

$H_{total,C-501}$  = altura total de la columna (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de la columna será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.114 } V_{pared,C-501} = V_{ext,C-501} - V_{int,C-501} = 95,49 - 83,41 = 12,08 m^3$$

Dónde:

$V_{int,C-501}$  = volumen interno de la columna ( $m^3$ )

$V_{ext,C-501}$  = volumen externo de la columna ( $m^3$ )

$V_{pared,C-501}$  = volumen de la pared de la columna ( $m^3$ )

Por lo que, al final, el volumen total de la columna ocupada por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.115 } V_{pared\ columna} = V_{pared,C-501} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 12,08 m^3 + 2 \cdot 0,60 m^3 = 13,28 m^3$$

### 11.2.5.3.2 Peso de la columna

#### Peso de la columna vacía:

En este apartado se calculará el peso de la columna si ésta estuviera vacía de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener de la columna como los platos perforados. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de  $8000 \text{ kg/m}^3$ , **[18]** y **[8]**:

$$\text{Ecuación 11.116 } M_{C-501,vacia} = (V_{pared\ columna} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (13,28 \text{ m}^3 \cdot 8000 \text{ kg/m}^3) \cdot 1,1 = 116864 \text{ kg}$$

Dónde:

$M_{C-501,vacia}$  = peso de la columna vacía (kg)

$\rho_{acero\ 316L}$  = densidad del acero 316L ( $\text{kg/m}^3$ )

#### Peso de la columna en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso de la columna llena de agua, es necesario conocer el volumen total de la columna, que en este caso son  $83,41 \text{ m}^3$  de la columna más 2 veces el volumen del cabezal  $2,70 \text{ m}^3$ , dando un total de  $88,81 \text{ m}^3$ .

Por tanto, el peso de la columna llena de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.117 } M_{C-501,agua} = M_{C-501,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{agua} = 116864 \text{ kg} + 88,81 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 205674 \text{ kg} = 205,7 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-501,agua}$  = peso de la columna llena de agua (kg)

$\rho_{agua}$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

Peso de la columna en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada de la columna:

$$\text{Ecuación 11.118 } M_{C-501,op} = M_{C-501,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{mezcla} = 116864 \text{ kg} + 88,81 \text{ m}^3 \cdot 1005 \text{ kg/m}^3 = 206118 \text{ kg} = 206,12 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-501,op}$  = peso de la columna con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\text{kg/m}^3$ )

11.2.5.4 Aislamiento de la columna

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en la zona del reboiler, como es nuestro caso 250°C aproximadamente, es necesario implementar un aislante que recubra la columna, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.119 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{1/4}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{250^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{3,00 \text{ m} \cdot 100}\right)^{1/4}} = 8,95 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la columna (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la columna (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12 cm, **[11]**, por lo que el grosor de 8,95 cm se aproximará a un grosor de 10 cm para unificar valores estándar hoy en día en la industria.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\textbf{Ecuación 11.120 } V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 120,03 \text{ m}^2 \cdot 0,10 \text{ m} = 12,00 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante ( $\text{m}^3$ )

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\textbf{Ecuación 11.121 } S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 100,85 \text{ m}^2 + 2 \cdot 9,59 \text{ m}^2 = 120,03 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.122 } S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 3,21 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} = 100,85 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.123 } S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 3,21 \text{ m}^2 = 9,59 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales de la columna ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,c}}$  = sección externa del cuerpo de la columna ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa de la columna ( $\text{m}^2$ )

---

### 11.3 Diseño de las columnas de absorción

La absorción es una operación unitaria en la que se pretenden eliminar ciertos componentes de una misma corriente de un fluido en forma gas al ser absorbidos por un líquido no volátil (absorbente), en este caso agua.

Esta también se trata de una operación de etapas de equilibrio con contacto de líquido-gas para favorecer así el contacto entre las dos fases diferenciadas, aumentando el rendimiento de la operación. La diferencia de concentración entre las dos fases (gradiente de concentración) resulta ser la fuerza impulsora de la operación de separación.

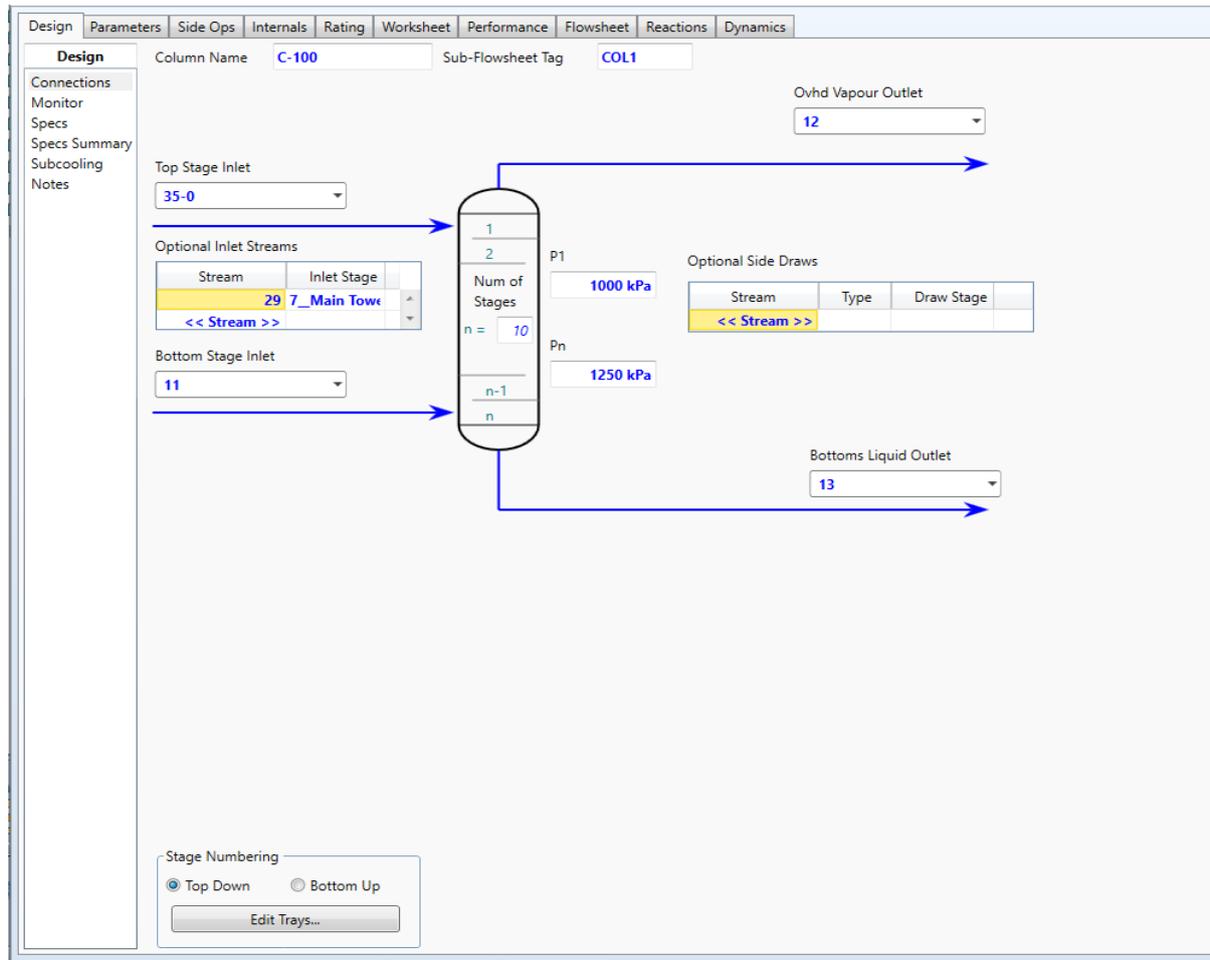
Las absorciones, como pasaba con las destilaciones, se pueden realizar mediante platos teóricos o de forma empacada. En este caso, también se han diseñado columnas de platos debido a sus ventajas comentadas en el apartado anterior de las columnas de destilación.

Así mismo, para las absorciones se han usado tanto platos perforados tipo Sieve como platos tipo Bubble cap, debido a que una de las columnas daba muchos problemas tanto hidráulicos como de pérdida de presión si se usaban los perforados, así que, aunque estos sean económicamente más viables, se deberá usar los de tipo Bubble cap.

### 11.3.1 Columna de absorción C-300

#### 11.3.1.1 Diseño en Aspen Hysys

En primer lugar, en la **figura 11.40**, se pueden observar las condiciones iniciales de operación de la columna de absorción C-300, sabiendo que trabajará a una presión superior a la atmosférica, [3]:



**Figura 11.40.** Condiciones de operación de la columna de absorción C-300 diseñada en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.40**, y según referencias encontradas, se ha decidido trabajar a una presión superior a la atmosférica (entre 9,85 - 12 atm aproximadamente). Así mismo, se puede observar cómo se trabaja con una columna de platos teóricos en vez de trabajar con una empacada.

Finalmente, se obtiene una columna de 10 etapas de equilibrio, donde a parte del alimento principal proveniente de la salida de los reactores, otro corriente gas (fracción de vapor de 0,4) es introducido en la etapa número 7 a una temperatura de 25°C, proveniente de las recirculaciones de la torre T-300 y la columna de absorción C-401, con el objetivo principal de separar el óxido de etileno, como producto principal absorbido en agua (líquido absorbente), de los demás componentes gas contaminantes como el dióxido de carbono o

aquellos reactivos que no han reaccionado. Así mismo, el agua que se usa como absorbente proviene, tanto de red, como recirculación del corriente residuo de la última destilación C-402.

A continuación, se indican en la **tabla 11.15** las condiciones de operación y las composiciones molares del corriente de alimentación, líquido absorbente, alimentación recirculada, gas de salida y residuo líquido absorbido:

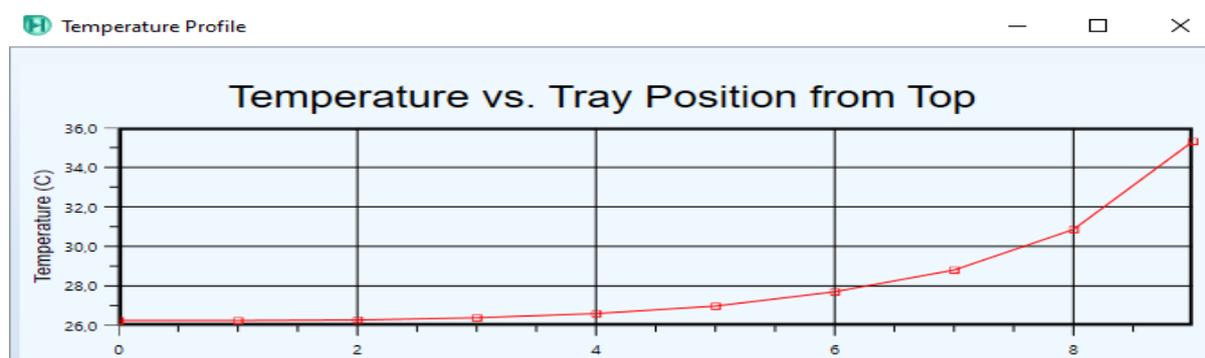
**Tabla 11.15.** Balance de materia de las corrientes de alimentación, recirculación, líquido absorbente, gas de salida y líquido de salida de la columna C-300.

	Alimentación (11)	Recirculación (29)	Líquido Absorbente (35)	Gas salida (12)	Líquido Salida (13)
<b>Fracción de vapor</b>	0,996	0,429	0	1	0
<b>Temperatura (°C)</b>	51	80	25°C	26,25	35,3
<b>Presión (kPa)</b>	1870	1500	1500	1000	1250
<b>Caudal molar (kmol/h)</b>	$1,355 \cdot 10^4$	33,19	$3,032 \cdot 10^4$	$1,308 \cdot 10^4$	$3,082 \cdot 10^4$
<b>Caudal másico (kg/h)</b>	$3,933 \cdot 10^5$	948,5	$5,463 \cdot 10^5$	$3,754 \cdot 10^5$	$5,651 \cdot 10^5$
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	20,65	35,91	1007	11,69	996,8
<b>Fracción molar</b>					
<b>Agua (H<sub>2</sub>O)</b>	0,0115	0,5271	0,9999	0,0038	0,9877
<b>Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)</b>	0,1929	0,0166	0	0,1998	0
<b>Oxígeno (O<sub>2</sub>)</b>	0,04	0,0094	0	0,0415	0
<b>Óxido de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)</b>	0,0269	0,1889	0,0001	0,0002	0,012
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	0,0332	0,1731	0	0,0344	0,0002
<b>Nitrógeno (N<sub>2</sub>)</b>	0,6954	0,0849	0	0,7203	0,0001
<b>Caudal molar (kmol/h)</b>					
<b>Agua (H<sub>2</sub>O)</b>	155,83	17,49	30320,27	49,25	30444,34
<b>Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)</b>	2613,46	0,55	0	2613,46	0,55
<b>Oxígeno (O<sub>2</sub>)</b>	542,18	0,31	0	542,18	0,31
<b>Óxido de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)</b>	364,73	6,27	2,7	3,23	370,47
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	449,73	5,74	0	449,67	5,8
<b>Nitrógeno (N<sub>2</sub>)</b>	9421,23	2,82	0	9421,24	2,81

Tal y como se puede observar en la **tabla 11.15**, la alimentación contiene una mezcla de componentes de la salida del reactor, con un 69% de nitrógeno y una fracción molar de 2,69% no superando así el 3% límite. Así mismo, el corriente recirculado contiene mayormente vapor de agua (53%) junto con pequeñas cantidades de los otros compuestos gases.

Por otro lado, por el corriente de líquido de salida sale casi en su totalidad el óxido de etileno (99,99% de absorción del de alimentación) absorbido con agua (98%). Por último, el corriente de gas de salida contiene prácticamente la totalidad de los otros componentes que entraban a la columna en forma gas, junto a los reactivos no reaccionados y la mayoría del dióxido de carbono.

Una vez que se ha finalizado con el diseño mediante el simulador HYSYS, este también permite la obtención de diferentes representaciones gráficas que relacionan, por ejemplo, la temperatura en función del plato de equilibrio en que nos encontremos. Estos parámetros están representados en la **figura 11.41** siguiente:



**Figura 11.41.** Representación gráfica de la temperatura de la columna en función del plato de la columna C-300.

### 11.3.1.2 Diseño mecánico

#### 11.3.1.2.1 Internals de la columna

En primer lugar, se detallarán los internals obtenidos mediante el programa Aspen Hysys de la columna C-300, dónde están incluidos diseño de platos, diámetro y altura de la columna o espaciado entre platos, entre otros.

Debido a las condiciones de operación de la columna mostradas anteriormente, se ha optado por utilizar un tipo de plato en concreto: plato perforado (sieve). Se han elegido los platos perforados ya que su construcción es más sencilla, requiriendo la perforación de pequeños agujeros en la bandeja reduciendo considerablemente su coste final y, por ello, es uno de los más empleados en la industria actualmente.

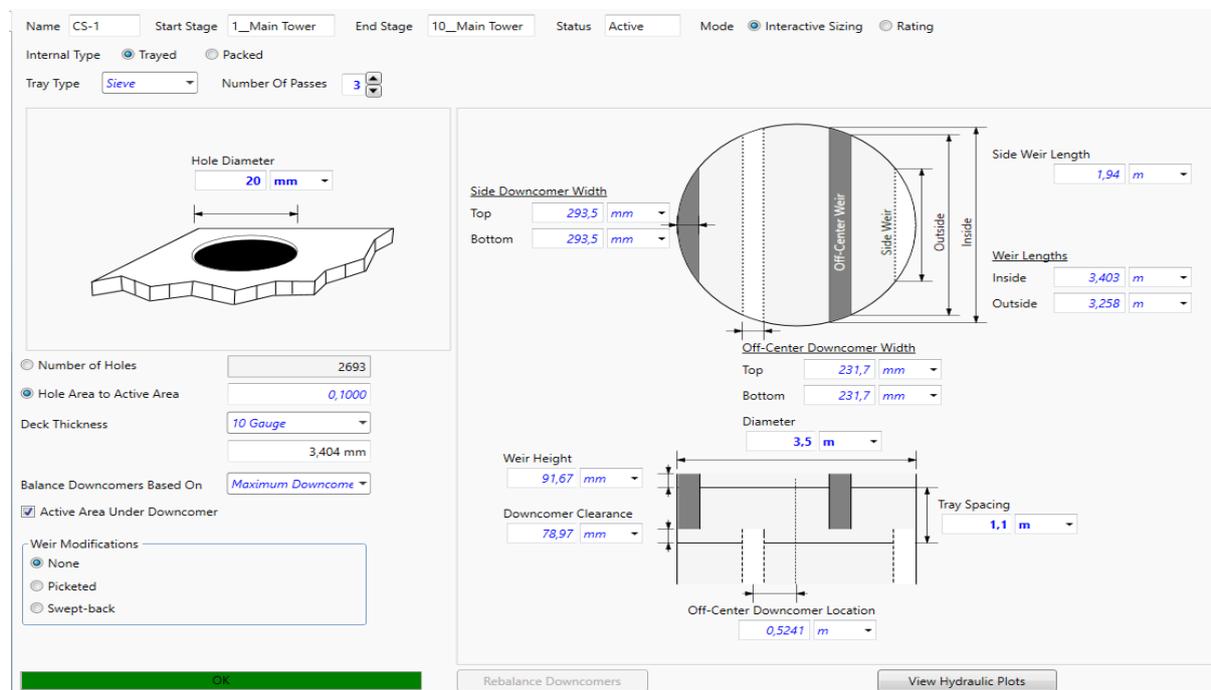


Figura 11.42. Características geométricas de los platos de la columna C-300 en Aspen Hysys.

Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Tower: Main Tower Selected Internals: Internals-1 Transport Properties Flows

**Column Internals Summary**

Number Of Stages	10
Total Height [m]	11,00
Total Head Loss [mm]	1792
Total Pressure Drop [mbar]	176,5
Number Of Sections	1
Number Of Diameters	1
Pressure Drop Across Sump [kPa]	<empty>

**Sections Summary**

Section	Start	End	Diameter [m]	Height [m]	Internal Type	Tray or Packin Type	Section Pressure Drop [mbar]	Approach To Flood [%]	Limiting Stage
CS-1	1_Main Tower	10_Main Towe	3,500	11,00	Trayed	Sieve	176,5	84,69	1_Main Tower

Figura 11.43. Diseño mecánico (internals) de la columna C-300 en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.43**, se ha diseñado una columna de 11 m de altura y 3,5 m de diámetro interno, siendo la relación entre estas de 3,14, siendo óptima mientras esté en un rango entre 3 y 10 ( $H/D = 3 - 10$ ). Así mismo, se ha decidido que esta columna trabaje siempre a una misma sección en todas las etapas de equilibrio. Por otro lado, en la **figura 11.42**, se puede observar cómo se ha escogido platos perforados tipo Sieve con un diámetro de agujero de 20 mm y un número total de agujeros de 2693.

Por último, la siguiente **tabla 11.16** muestra los parámetros, como los resultados hidráulicos, geometría de la columna o características de los platos, del diseño obtenido para la columna de absorción C-300:

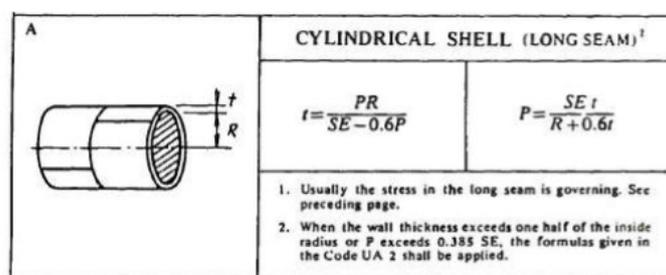
**Tabla 11.16.** Tabla de características y geometría de platos y parámetros hidráulicos de la columna C-300.

Geometría	
Diámetro (m)	3,5
Espaciado entre platos (m)	1,1
Altura (m)	11
Área transversal (m <sup>2</sup> )	9,62
Área activa (m <sup>2</sup> )	8,46
Características de los platos	
Tipo de plato	Perforado (Sieve)
Número de pasos del flujo	3
Método de inundación	Glitsch
Número de orificios	2693
Diámetro de orificios (mm)	20
Altura de vertedero (mm)	91,67
Parámetros hidráulicos	
Máxima pérdida de presión por plato (kPa)	1,8
Carga máxima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	134,1
Carga mínima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	4,47

### 11.3.1.2.2 Espesor de columna y cabezales

#### Espesor de columna:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá la columna de absorción C-300 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.44**:



**Figura 11.44.** Fórmulas para el cálculo del espesor de la columna de absorción C-300.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.124} \quad t_{C-300} = \frac{P_{C-300} \cdot R_{int,C-300}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{C-300}} + C_1 = \frac{12 \text{ atm} \cdot 1750 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 12 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 24,81 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{C-300}$  = espesor mínimo que tiene que tener la columna C – 300 (mm)

$P_{C-300}$  = presión de operación a la que trabaja la columna C – 300 (atm)

$R_{int,C-300}$  = radio interno de la columna C – 300 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 50°C o 122°F y la presión de 12 atm, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.124**, se ha obtenido un grosor de unos 24,81 mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 25mm.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales de la columna de absorción C-300 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.45**:

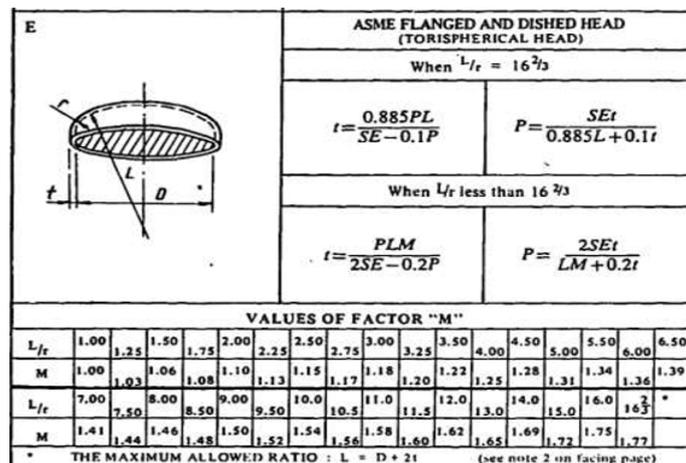


Figura 11.45. Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales la columna de destilación C-300.

Dónde:

Si  $t_{C-300}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,C-300}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{C-300}/L = 25 \text{ mm}/3500 \text{ mm} \sim 0,007 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 3500 = 210 \text{ mm}$ ,  $L = 3500 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 3500 \text{ mm}/210 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.45**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

$$\text{Ecuación 11.145 } t_{cab,C-300} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 12 \text{ atm} \cdot 3500 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} - 0,1 \cdot 12 \text{ atm}} = 40,98 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$$t_{cab,C-300r} = 1,1 \cdot t_{cab,C-300} = 1,1 \cdot 40,98 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$$

Por último, como los valores del espesor de los cabezales y el de la columna son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 45mm.

### 11.3.1.2.3 Altura de columna y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real de la columna en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,C-300} - 0,455 \cdot t_{cab,C-300} = 0,1935 \cdot 3500mm - 0,455 \cdot 45mm = 656,77mm$$

$$\text{Ecuación 11.126 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,C-300} = 3,5 \cdot 45 mm = 157,50 mm$$

$$\text{Ecuación 11.127 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 157,50 mm + 656,77 mm = 814,27 mm = 0,814 m$$

Dónde:

$D_{int,C-300}$  = diámetro interno de la columna (mm)

$t_{cab,C-300}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,814 m, la altura real de la columna pasará a ser de 12,63 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.128 } H_{total,C-300} = H_{C-300} + 2 \cdot H_{cab,C-300} = 11 m + 2 \cdot 0,814m = 12,63 m$$

Dónde:

$H_{total,C-300}$  = altura total de la columna C – 300 (m)

$H_{C-300}$  = altura teórica de la columna C – 300 (m)

$H_{cab,C-300}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.3.1.3 Volumen y peso de la columna

#### 11.3.1.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos de la columna, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

#### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\textbf{Ecuación 11.129} \quad V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,C-300})^3 = 0,1 \cdot (3,5 \text{ m})^3 = 4,29 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{int,C-300}$  = diámetro interno de la columna (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\textbf{Ecuación 11.130} \quad V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,C-300})^3 = 0,1 \cdot (3,59\text{m})^3 = 4,63 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{ext,C-300}$  = diámetro externo de la columna (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\textbf{Ecuación 11.131} \quad V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 4,63 - 4,29 = 0,34 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

Volumen de columna:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.132 } V_{int,C-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,C-300})^2 \cdot H_{total,C-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,5)^2 \cdot 12,63 \text{ m} = 121,51 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-300} = \text{volumen interno de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{int,C-300} = \text{diámetro interno de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-300} = \text{altura total de la columna (m)}$$

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.133 } V_{ext,C-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,C-300})^2 \cdot H_{total,C-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (3,59)^2 \cdot 12,63 \text{ m} = 127,84 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{ext,C-300} = \text{volumen externo de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{ext,C-300} = \text{diámetro externo de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-300} = \text{altura total de la columna (m)}$$

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de la columna será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.134 } V_{pared,C-300} = V_{ext,C-300} - V_{int,C-300} = 127,84 - 121,51 = 6,33 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-300} = \text{volumen interno de los cabezales (m}^3\text{)}$$

$$V_{ext,C-300} = \text{volumen externo de los cabezales (m}^3\text{)}$$

$$V_{pared,C-300} = \text{volumen de la pared de los cabezales (m}^3\text{)}$$

Por lo que, al final, el volumen total de la columna ocupada por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.135 } V_{pared \text{ columna}} = V_{pared,C-100} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 6,33 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,34 \text{ m}^3 = 7,01 \text{ m}^3$$

### 11.3.1.3.2 Peso de la columna

#### Peso de la columna vacía:

En este apartado se calculará el peso de la columna si ésta estuviera vacía de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener de la columna como los platos perforados. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de 8000 kg/m<sup>3</sup>, **[18]** y **[8]**:

$$\text{Ecuación 11.136 } M_{C-300,vacia} = (V_{pared\ columna} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (7,01\ m^3 \cdot 8000\ \frac{kg}{m^3}) \cdot 1,1 = 61688\ kg$$

Dónde:

$$M_{C-300,vacia} = \text{peso de la columna vacía (kg)}$$

$$\rho_{acero\ 316L} = \text{densidad del acero 316L (}\frac{kg}{m^3}\text{)}$$

#### Peso de la columna en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso de la columna llena de agua, es necesario conocer el volumen total de la columna, que en este caso son 121,51 m<sup>3</sup> de la columna más 2 veces el volumen del cabezal 4,29 m<sup>3</sup>, dando un total de 130 m<sup>3</sup>.

Por tanto, el peso de la columna llena de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.137 } M_{C-300,agua} = M_{C-300,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{agua} = 61688\ kg + 130\ m^3 \cdot 1000\ \frac{kg}{m^3} = 191688\ kg = 191,69\ tn$$

Dónde:

$$M_{C-300,agua} = \text{peso de la columna llena de agua (kg)}$$

$$\rho_{agua} = \text{densidad del agua (}\frac{kg}{m^3}\text{)}$$

Peso de la columna en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada de la columna:

$$\text{Ecuación 11.138 } M_{C-300,op} = M_{C-300,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{mezcla} = 61688 \text{ kg} + 130 \text{ m}^3 \cdot 1007 \text{ kg/m}^3 = 192598 \text{ kg} = 192,59 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-300,op}$  = peso de la columna con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\text{kg/m}^3$ )

11.3.1.4 Aislamiento de la columna

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en la columna de absorción C-300, como es nuestro caso una máxima de 80°C, es necesario implementar un aislante, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.139 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{\frac{1}{4}}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{80^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{3,59 \text{ m} \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 12,05 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la columna (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la columna de absorción (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12 cm, [11], por lo que el grosor de 12,05 se aproximará a un grosor de 12 cm para unificar valores estándar hoy en día en la industria.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\textbf{Ecuación 11.140} \quad V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 148,04 \text{ m}^2 \cdot 0,12 \text{ m} = 17,76 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante ( $\text{m}^3$ )

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\textbf{Ecuación 11.141} \quad S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 124,06 \text{ m}^2 + 2 \cdot 11,99 \text{ m}^2 = 148,04 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.142} \quad S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 3,59 \text{ m} \cdot 11 \text{ m} = 124,06 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.143} \quad S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 3,59 \text{ m}^2 = 11,99 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales ( $\text{m}^2$ )

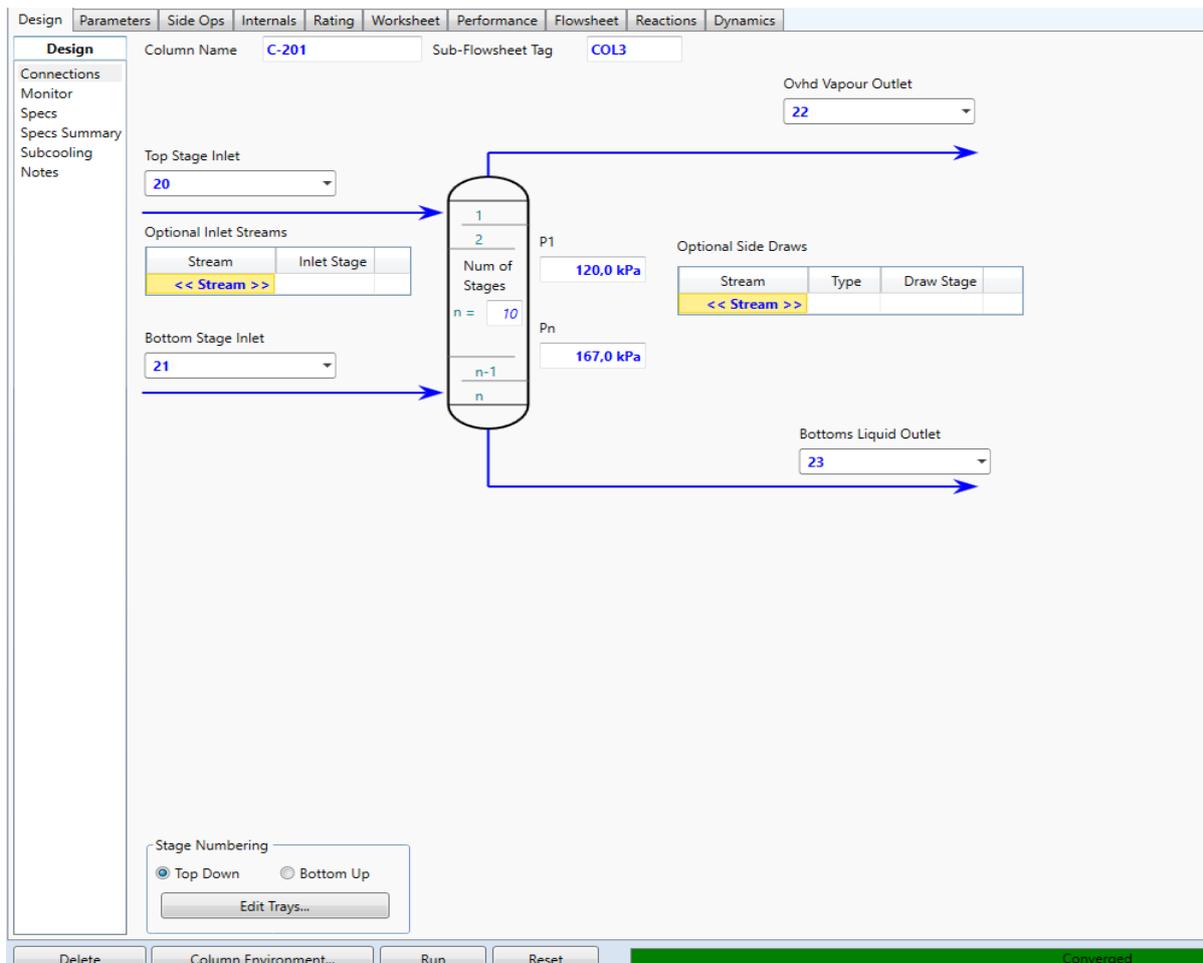
$S_{\text{ext,c}}$  = sección externa del cuerpo de la columna ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa de la columna ( $\text{m}^2$ )

### 11.3.2 Columna de absorción C-401

#### 11.3.2.1 Diseño en Aspen Hysys

En primer lugar, en la **figura 11.46**, se pueden observar las condiciones iniciales de operación de la columna de absorción C-401, sabiendo que trabajará a una presión superior a la atmosférica, según indica la patente, [3]:



**Figura 11.46.** Condiciones de operación de la columna de absorción C-401 diseñada en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.46**, y según referencias encontradas, se ha decidido trabajar a una presión superior a la atmosférica (entre 1,20 – 1,65 atm aproximadamente). Así mismo, se puede observar cómo se trabaja con una columna de platos en vez de trabajar con una empacada.

Finalmente, se obtiene una columna de 10 etapas de equilibrio, donde la alimentación proviene de la salida por cabeza de la columna de destilación C-400. Así mismo, el agua que se usa como absorbente proviene de la salida del residuo de la columna C-400. El objetivo principal de esta operación es acabar de absorber en agua la mayor cantidad posible de óxido de etileno eliminando así por cabeza de columna los demás componentes, aumentando así

su pureza y, en la etapa posterior de deshidratación mediante una destilación, obtener el producto con una pureza del 99,97%.

A continuación, se indican en la **tabla 11.17** las condiciones de operación y las composiciones molares del corriente de alimentación, líquido absorbente, gas de salida y residuo líquido:

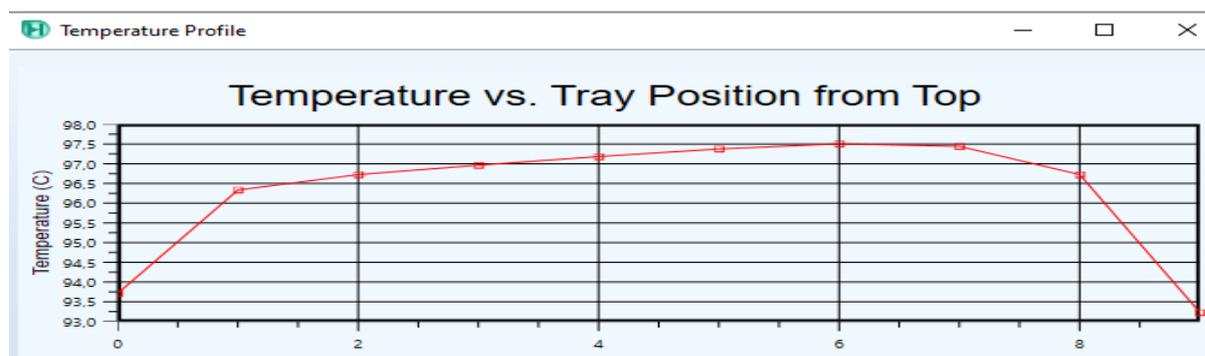
**Tabla 11.17.** Balance de materia de las corrientes de alimentación, líquido absorbente, gas de salida y líquido de salida de la columna C-401.

	Alimentación (21)	Líqu. Absorbente (20)	Gas salida (22)	Líqu. Salida (23)
Fracción de vapor	1	0	1	0
Temperatura (°C)	60,7	90	93,72	93,23
Presión (kPa)	200	200	120	167
Caudal molar (kmol/h)	390	$3,042 \cdot 10^4$	22,07	$3,079 \cdot 10^4$
Caudal másico (kg/h)	$1,67 \cdot 10^4$	$5,481 \cdot 10^5$	581,4	$5,642 \cdot 10^5$
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	3,172	956,3	1,046	949,9
<b>Fracción molar</b>				
Agua (H <sub>2</sub> O)	0,0474	1	0,6728	0,9882
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0,0001	0	0,0012	0
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,0001	0	0,0016	0
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	0,942	0	0,1438	0,0118
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,0099	0	0,1714	0
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0,0005	0	0,0092	0
<b>Caudal molar (kmol/h)</b>				
Agua (H <sub>2</sub> O)	18,49	30423,2	14,85	30426,84
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0,027	0	0,027	0
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,036	0	0,036	$1 \cdot 10^{-4}$
Óxido de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	367,36	0,0112	3,17	364,2
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	3,87	0	3,78	0,088
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0,202	0	0,2	0,002

Tal y como se puede observar en la **tabla 11.17**, la alimentación contiene una mezcla de componentes de la salida de cabeza de la columna de destilación C-400, con una mayor parte de óxido de etileno 94% y un 4,7% de vapor de agua.

Por otro lado, por el corriente de líquido de salida sale casi en su totalidad el óxido de etileno (99,1% de absorción del de alimentación) absorbido con agua (98,82%). Por último, el corriente de gas de salida contiene prácticamente la totalidad de los otros componentes que entraban a la columna en forma gas, junto a los reactivos no reaccionados y la mayoría del dióxido de carbono que restaba en el proceso.

Una vez que se ha finalizado con el diseño mediante el simulador HYSYS, este también permite la obtención de diferentes representaciones gráficas que relacionan, por ejemplo, la temperatura en función del plato de equilibrio en que nos encontremos. Estos parámetros están representados en la **figura 11.48** siguiente:



**Figura 11.48.** Representación gráfica de la temperatura de la columna en función del plato de la columna C-401.

### 11.3.2.2 Diseño mecánico

#### 11.3.2.2.1 Internals de la columna

En primer lugar, se detallarán los internals obtenidos mediante el programa Aspen Hysys de la columna C-401, dónde están incluidos diseño de platos, diámetro y altura de la columna o espaciado entre platos, entre otros.

Debido a las condiciones de operación de la columna mostradas anteriormente y a los problemas tanto hidráulicos como de pérdida de carga de la columna, se ha optado por utilizar un tipo de plato en concreto: plato tipo Bubble cap.

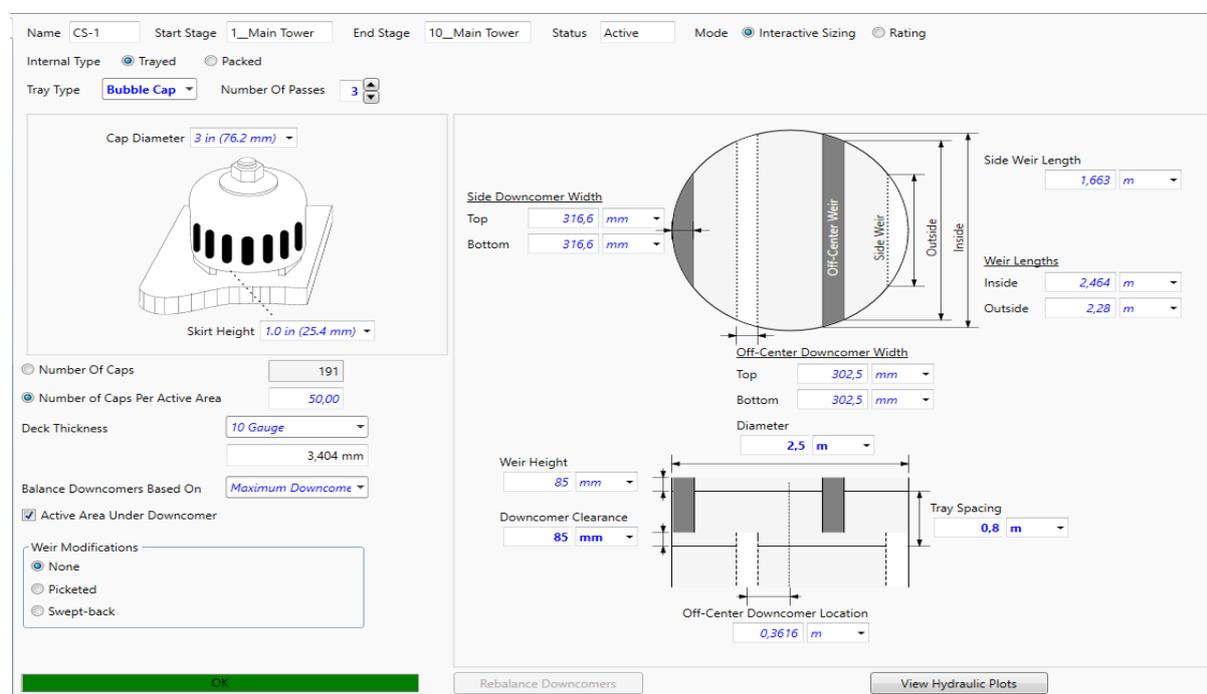


Figura 11.49. Características geométricas de los platos de la columna C-401 en Aspen Hysys.

Column Internals Summary										
Number Of Stages	10									
Total Height [m]	8,000									
Total Head Loss [mm]	1022									
Total Pressure Drop [mbar]	95,07									
Number Of Sections	1									
Number Of Diameters	1									
Pressure Drop Across Sump [kPa]	<empty>									

Sections Summary										
Section	Start	End	Diameter [m]	Height [m]	Internal Type	Tray or Packin Type	Section Pressure Drop [mbar]	Approach To Flood [%]	Limiting Stage	
CS-1	1_Main Tower	10_Main Tower	2,500	8,000	Trayed	Bubble Cap	95,07	37,23	8_Main Tower	<a href="#">View</a>

Figura 11.50. Diseño mecánico (internals) de la columna C-401 en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.50**, se ha diseñado una columna de 8 m de altura y 2,5 m de diámetro interno, siendo la relación entre estas de 3,2, siendo óptima mientras esté en un rango entre 3 y 10 ( $H/D = 3 - 10$ ).

Así mismo, se ha decidido que esta columna trabaje siempre a una misma sección en todas las etapas de equilibrio. Por otro lado, en la **figura 11.49**, se puede observar cómo se ha escogido platos tipo Bubble cap de diámetro de cabezal de 76,2 mm y un número total de 191.

Por último, la siguiente **tabla 11.18** muestra los parámetros, como los resultados hidráulicos, geometría de la columna o características de los platos, del diseño obtenido para la columna de absorción C-401:

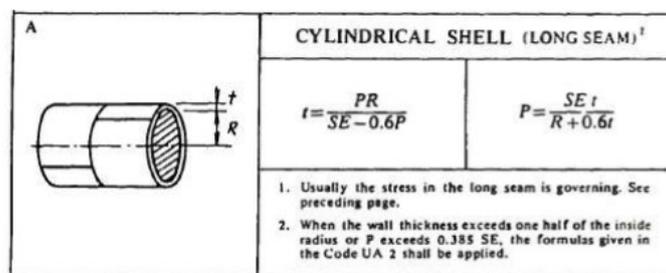
**Tabla 11.18.** Tabla de características y geometría de platos y parámetros hidráulicos de la columna C-401.

Geometría	
Diámetro (m)	2,5
Espaciado entre platos (m)	0,8
Altura (m)	8
Área transversal (m <sup>2</sup> )	4,91
Área activa (m <sup>2</sup> )	3,83
Características de los platos	
Tipo de plato	Bubble cap
Número de pasos del flujo	3
Método de inundación	Glitsch
Número de Bubble cap	191
Diámetro de del cabezal (mm)	76,2
Altura de vertedero (mm)	66,67
Parámetros hidráulicos	
Máxima pérdida de presión por plato (kPa)	1
Carga máxima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	134,1
Carga mínima de vertedero (m <sup>3</sup> /h·m)	4,47

### 11.3.2.2.2 Espesor de columna y cabezales

#### Espesor de columna:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá la columna de absorción C-401 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.51**:



**Figura 11.51.** Fórmulas para el cálculo del espesor de la columna de absorción C-401.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.144 } t_{C-401} = \frac{P_{C-401} \cdot R_{int,C-401}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{C-401}} + C_1 = \frac{1,65 \text{ atm} \cdot 1250 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,65 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 3,77 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{C-401}$  = espesor mínimo que tiene que tener la columna C – 401 (mm)

$P_{C-401}$  = presión de operación a la que trabaja la columna C – 401 (atm)

$R_{int,C-401}$  = radio interno de la columna C – 401 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

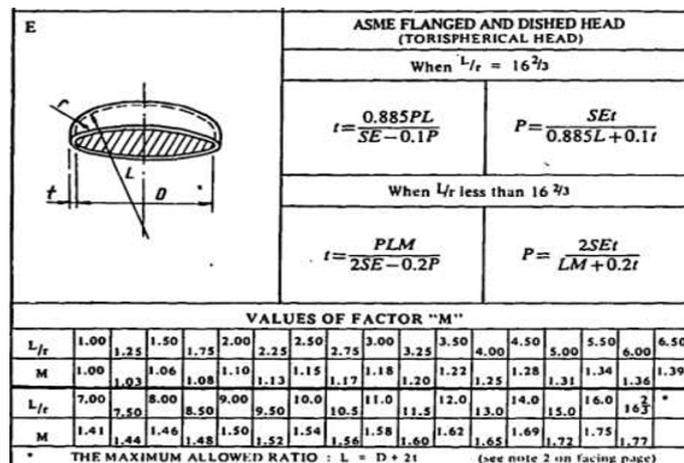
$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 93°C o 199°F y la presión de 1,65 atm, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.144**, se ha obtenido un grosor de unos 3,77mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 4mm, según los estándares en el mundo de la industria.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales de la columna de absorción C-401 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.52**:



**Figura 11.52.** Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales la columna de absorción C-401.

Dónde:

Si  $t_{C-401}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,C-401}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{C-401}/L = 4 \text{ mm}/2500 \text{ mm} \sim 0,002 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 2500 = 150 \text{ mm}$ ,  $L = 2500 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 2500 \text{ mm}/150 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.52**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

**Ecuación 11.145**  $t_{cab,C-401} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{SE - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 1,65 \text{ atm} \cdot 2500 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} - 0,1 \cdot 1,65 \text{ atm}} = 4,02 \text{ mm}$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$t_{cab,C-401'} = 1,1 \cdot t_{cab,C-401} = 1,1 \cdot 4,02 \text{ mm} = 5 \text{ mm}$

Por último, como los valores del espesor de los cabezales y el de la columna son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 5mm.

### 11.3.2.2.3 Altura de columna y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real de la columna en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,C-401} - 0,455 \cdot t_{cab,C-401} = 0,1935 \cdot 2500mm - 0,455 \cdot 5mm = 481,47mm$$

$$\text{Ecuación 11.146 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,C-401} = 3,5 \cdot 5 \text{ mm} = 17,5 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.147 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 481,47 \text{ mm} + 17,5 \text{ mm} = 498,97 \text{ mm} = 0,498 \text{ m}$$

Dónde:

$D_{int,C-401}$  = diámetro interno de la columna (mm)

$t_{cab,C-401}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,498 m, la altura real de la columna pasará a ser de 9 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.148 } H_{total,C-401} = H_{C-401} + 2 \cdot H_{cab,C-401} = 8 \text{ m} + 2 \cdot 0,498m = 8,996 \text{ m} = 9 \text{ m}$$

Dónde:

$H_{total,C-401}$  = altura total de la columna C – 401 (m)

$H_{C-401}$  = altura teórica de la columna C – 401 (m)

$H_{cab,C-401}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.3.2.3 Volumen y peso de la columna

#### 11.3.2.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos de la columna, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

#### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\textbf{Ecuación 11.149 } V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,C-401})^3 = 0,1 \cdot (2,5 \text{ m})^3 = 1,56 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{int,C-401}$  = diámetro interno de la columna (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\textbf{Ecuación 11.150 } V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,C-401})^3 = 0,1 \cdot (2,51 \text{ m})^3 = 1,58 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{ext,C-401}$  = diámetro externo de la columna (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\textbf{Ecuación 11.151 } V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 1,58 - 1,56 = 0,02 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

Volumen de columna:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.152 } V_{int,C-401} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,C-401})^2 \cdot H_{total,C-401} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,5)^2 \cdot 9 \text{ m} = 44,18 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-401} = \text{volumen interno de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{int,C-401} = \text{diámetro interno de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-401} = \text{altura total de la columna (m)}$$

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.153 } V_{ext,C-401} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,C-401})^2 \cdot H_{total,C-401} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,51)^2 \cdot 9 \text{ m} = 44,53 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{ext,C-401} = \text{volumen externo de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{ext,C-401} = \text{diámetro externo de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-401} = \text{altura total de la columna (m)}$$

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de la columna será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.154 } V_{pared,C-401} = V_{ext,C-401} - V_{int,C-401} = 44,53 - 44,18 = 0,35 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-401} = \text{volumen interno de los cabezales (m}^3\text{)}$$

$$V_{ext,C-401} = \text{volumen externo de los cabezales (m}^3\text{)}$$

$$V_{pared,C-401} = \text{volumen de la pared de los cabezales (m}^3\text{)}$$

Por lo que, al final, el volumen total de la columna ocupada por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.155 } V_{pared \text{ columna}} = V_{pared,C-401} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 0,35 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,02 \text{ m}^3 = 0,39 \text{ m}^3$$

### 11.3.2.3.2 Peso de la columna

#### Peso de la columna vacía:

En este apartado se calculará el peso de la columna si ésta estuviera vacía de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener de la columna como los platos perforados. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de 8000 kg/m<sup>3</sup>, **[18]** y **[8]**:

$$\text{Ecuación 11.156 } M_{C-401,vacia} = (V_{pared\ columna} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (0,39\ m^3 \cdot 8000\ \frac{kg}{m^3}) \cdot 1,1 = 3456,49\ kg$$

Dónde:

$$M_{C-401,vacia} = \text{peso de la columna vacía (kg)}$$

$$\rho_{acero\ 316L} = \text{densidad del acero 316L (}\frac{kg}{m^3}\text{)}$$

#### Peso de la columna en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso de la columna llena de agua, es necesario conocer el volumen total de la columna, que en este caso son 44,18 m<sup>3</sup> de la columna más 2 veces el volumen del cabezal 1,56 m<sup>3</sup>, dando un total de 47,3 m<sup>3</sup>.

Por tanto, el peso de la columna llena de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.157 } M_{C-401,agua} = M_{C-401,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{agua} = 3456,49\ kg + 47,3\ m^3 \cdot 1000\ \frac{kg}{m^3} = 50756\ kg = 50,75\ tn$$

Dónde:

$$M_{C-401,agua} = \text{peso de la columna llena de agua (kg)}$$

$$\rho_{agua} = \text{densidad del agua (}\frac{kg}{m^3}\text{)}$$

Peso de la columna en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada de la columna:

$$\text{Ecuación 11.158 } M_{C-401,op} = M_{C-401,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{mezcla} = 3456,49 \text{ kg} + 47,3 \text{ m}^3 \cdot 950 \text{ kg/m}^3 = 48391 \text{ kg} = 48,39 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-401,op}$  = peso de la columna con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\text{kg/m}^3$ )

11.3.2.4 Aislamiento de la columna

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en alguna parte de la columna, como es nuestro caso 93°C el corriente líquido de salida absorbido, es necesario implementar un aislante, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.159 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{\frac{1}{4}}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{93^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{2,51 \text{ m} \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 11,55 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la columna (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la columna (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12 cm, **[11]**, por lo que el grosor de 11,55 se aproximará a un grosor de 12 cm para unificar valores estándar hoy en día en la industria.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\textbf{Ecuación 11.160} \quad V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 74,81 \text{ m}^2 \cdot 0,12 \text{ m} = 8,98 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante ( $\text{m}^3$ )

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\textbf{Ecuación 11.161} \quad S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 63,08 \text{ m}^2 + 2 \cdot 5,86 \text{ m}^2 = 74,81 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.162} \quad S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 2,51 \text{ m} \cdot 8 \text{ m} = 63,08 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.163} \quad S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 2,51 \text{ m}^2 = 5,86 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales ( $\text{m}^2$ )

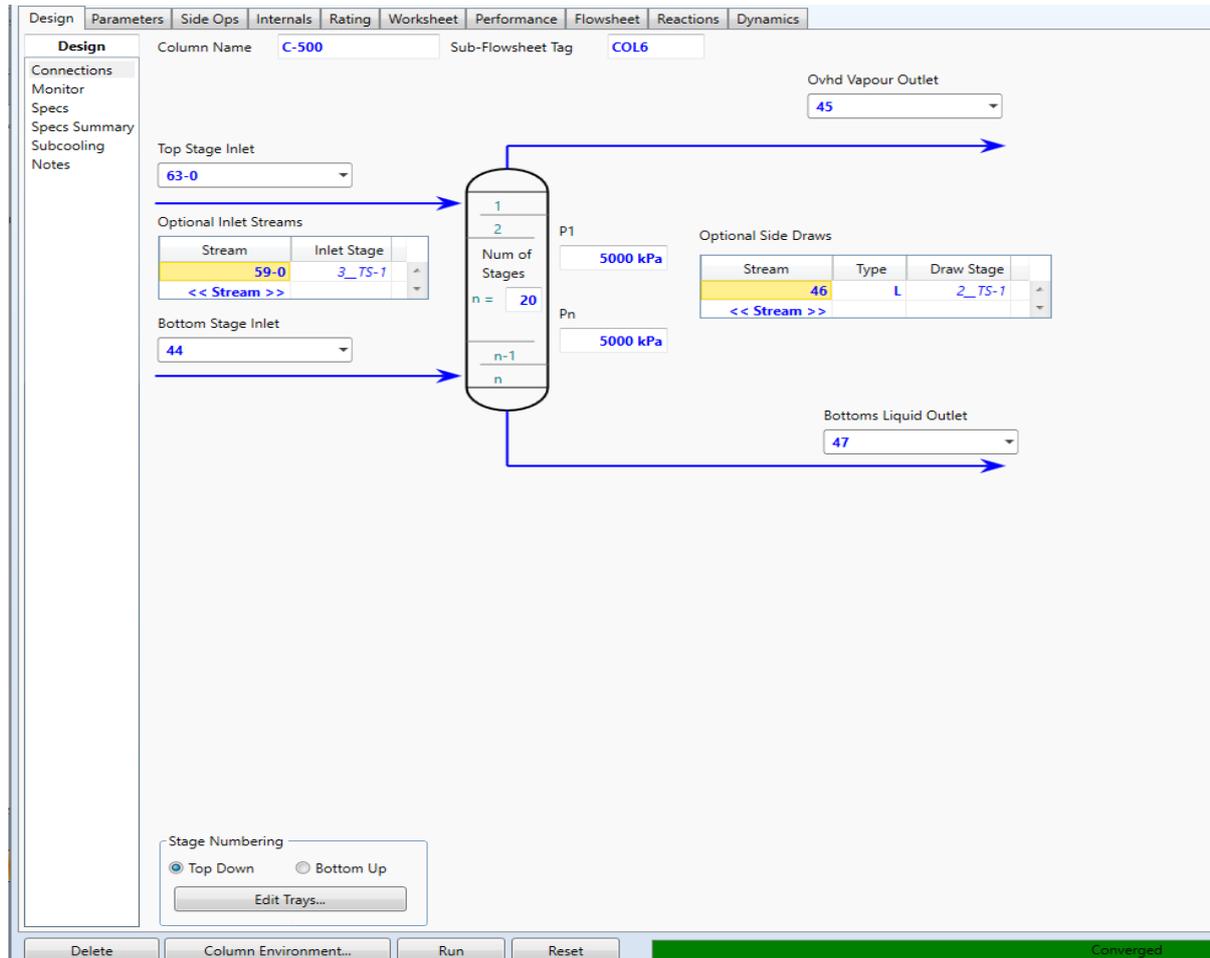
$S_{\text{ext,c}}$  = sección externa del cuerpo de la columna ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa de la columna ( $\text{m}^2$ )

### 11.3.3 Columna de absorción C-500

#### 11.3.3.1 Diseño en Aspen Hysys

En primer lugar, en la **figura 11.53**, se pueden observar las condiciones iniciales de operación de la columna de absorción C-500, sabiendo que trabajará a una presión muy superior a la atmosférica, [3]:



The screenshot shows the Aspen Hysys interface for the design of absorption column C-500. The 'Design' tab is active, and the 'Parameters' sub-tab is selected. The column is configured with 20 stages, operating at a pressure of 5000 kPa. The top stage inlet is stream 63-0, and the bottom stage inlet is stream 44. The overhead vapour outlet is stream 45, and the bottoms liquid outlet is stream 47. The column is configured for top-down stage numbering. The 'Optional Inlet Streams' table shows stream 59-0 entering at stage 3. The 'Optional Side Draws' table shows stream 46 as a liquid draw at stage 2.

Stream	Inlet Stage
59-0	3_TS-1
<< Stream >>	

Stream	Type	Draw Stage
46	L	2_TS-1
<< Stream >>		

**Figura 11.53.** Condiciones de operación de la columna de absorción C-500 diseñada en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.53**, y según referencias encontradas, se ha decidido trabajar a una presión superior a la atmosférica (unas 50 atm aproximadamente). Así mismo, se puede observar cómo se trabaja con una columna empacada en vez de trabajar con una de platos, debido al tipo de absorción con una mezcla con metilamina que se lleva a cabo.

Finalmente, se obtiene una columna de 20 etapas de equilibrio, donde la alimentación proviene de la salida por cabeza de la columna de absorción C-300. Así mismo, en este caso, para poder absorber el dióxido de carbono se ha usado una mezcla de metilamina con agua como fluido absorbente. El objetivo principal de esta operación es acabar de absorber en agua y metilamina la mayor cantidad posible de dióxido de carbono, eliminando así por

cabeza de columna los demás componentes, aumentando así su pureza y, en la etapa posterior de deshidratación mediante una destilación, obtener el dióxido de carbono con una pureza del 99,66%.

A continuación, se indican en la **tabla 11.19** las condiciones de operación y las composiciones molares del corriente de alimentación, líquido absorbente, gas de salida y residuo líquido:

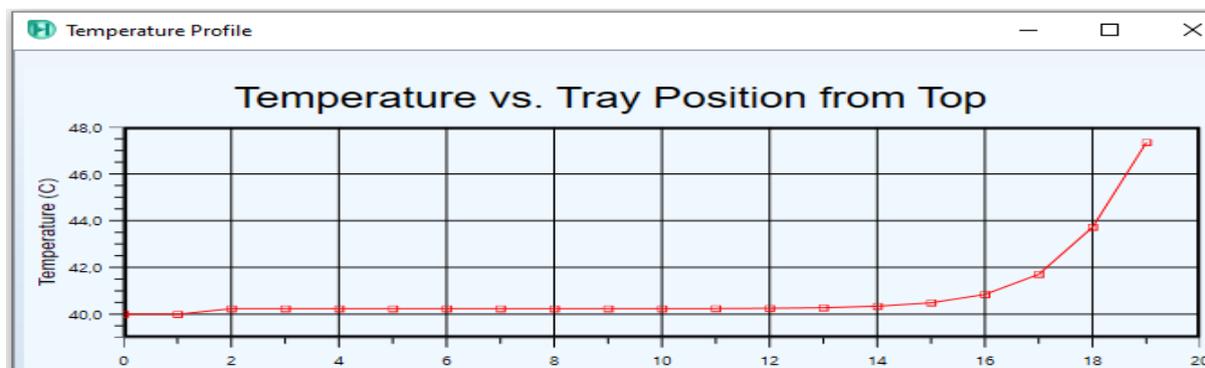
**Tabla 11.19.** Balance de materia de las corrientes de alimentación, líquido absorbente, gas de salida y líquido de salida de la columna C-500.

	Alimentación (21)	Líqu. Absorbente (20)	Gas salida (22)	Líqu. Salida (23)
<b>Fracción de vapor</b>	0,998	0	1	0
<b>Temperatura (°C)</b>	40	40	40	47,35
<b>Presión (kPa)</b>	5000	5000	5000	5000
<b>Caudal molar (kmol/h)</b>	3271	$1,73 \cdot 10^4$	3143	$1,65 \cdot 10^4$
<b>Caudal másico (kg/h)</b>	$9,39 \cdot 10^4$	$3,77 \cdot 10^5$	$8,85 \cdot 10^4$	$3,72 \cdot 10^5$
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	57,65	800	45,2	960
<b>Fracción molar</b>				
<b>Agua (H<sub>2</sub>O)</b>	0,0038	0,7198	0,002	0,8904
<b>Metilamina (C<sub>2</sub>H<sub>7</sub>NO)</b>	0	0,28	0	0,1021
<b>Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)</b>	0,2003	0	0,2072	0,0003
<b>Oxígeno (O<sub>2</sub>)</b>	0,0415	0	0,043	0
<b>Óxido de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)</b>	0,0002	0,0001	0	0,0001
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	0,0344	0,0001	0	0,0069
<b>Nitrógeno (N<sub>2</sub>)</b>	0,7198	0	0,7477	0,0003
<b>Caudal molar (kmol/h)</b>				
<b>Agua (H<sub>2</sub>O)</b>	12,32	14646,95	6,43	14653,51
<b>Metilamina (C<sub>2</sub>H<sub>7</sub>NO)</b>	0	1680,29	0,0002	1680,27
<b>Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)</b>	655,38	0	651,12	4,253
<b>Oxígeno (O<sub>2</sub>)</b>	135,65	0	135,15	0,499
<b>Óxido de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)</b>	0,804	0,788	0,0255	1,521
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	112,41	0,565	0,0001	111,82
<b>Nitrógeno (N<sub>2</sub>)</b>	2354,65	0	2349,87	4,77

Tal y como se puede observar en la **tabla 11.19**, la alimentación contiene una mezcla de componentes de la salida de cabeza de la columna de absorción C-300, con una mayor parte de nitrógeno con un 72% y los demás componentes son los gases no absorbidos.

Por otro lado, por el corriente de líquido de salida sale casi en su totalidad el dióxido de carbono (99,8% de absorción del de alimentación) absorbido con agua y metilamina (99%). Por último, el corriente de gas de salida contiene prácticamente la totalidad de los otros componentes que entraban a la columna en forma gas, junto a los reactivos no reaccionados.

Una vez que se ha finalizado con el diseño mediante el simulador HYSYS, este también permite la obtención de diferentes representaciones gráficas que relacionan, por ejemplo, la temperatura en función del plato de equilibrio en que nos encontremos. Estos parámetros están representados en la **figura 11.54** siguiente:



**Figura 11.54.** Representación gráfica de la temperatura de la columna en función del plato de la columna C-500.

### 11.3.3.2 Diseño mecánico

#### 11.3.3.2.1 Internals de la columna

En primer lugar, se detallarán los internals obtenidos mediante el programa Aspen Hysys de la columna C-500, dónde están incluidos diseño del empacado, diámetro y altura de la columna, entre otros.

Debido a las condiciones de operación de la columna mostradas anteriormente y a los problemas tanto hidráulicos como de pérdida de carga de la columna debido al uso de metilamina con agua como líquido absorbente, se ha optado por utilizar un tipo de empacado en concreto: empacado tipo Pall y hecho de metal.

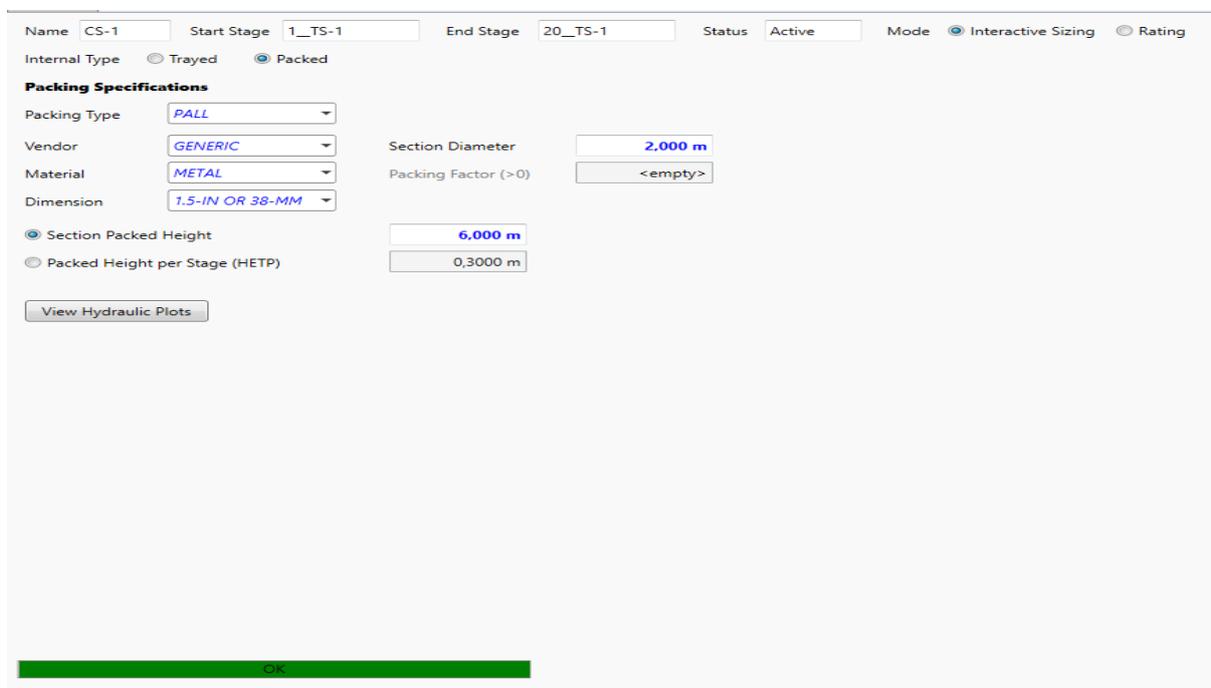
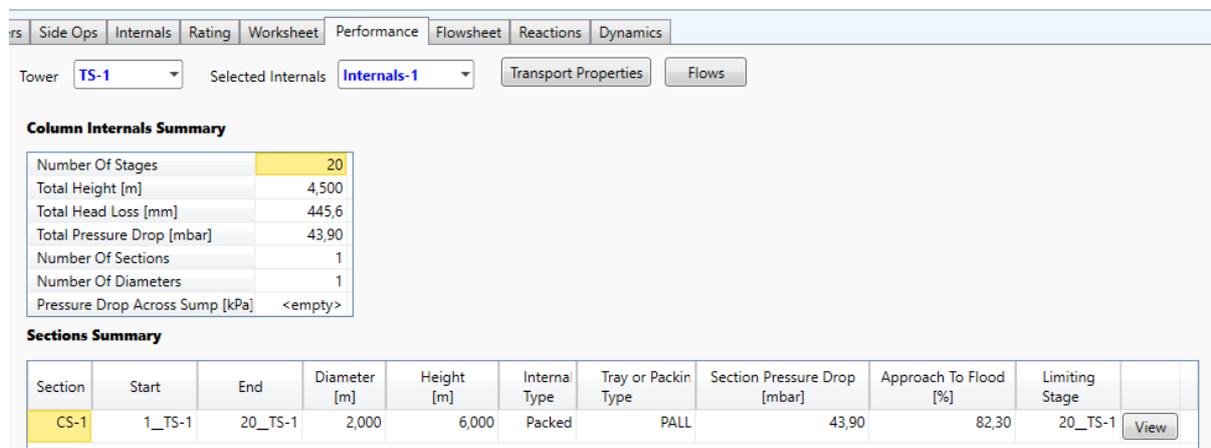


Figura 11.55. Características geométricas del empacado de la columna C-500 en Aspen Hysys.



Section	Start	End	Diameter [m]	Height [m]	Interna Type	Tray or Packin Type	Section Pressure Drop [mbar]	Approach To Flood [%]	Limiting Stage
CS-1	1_TS-1	20_TS-1	2,000	6,000	Packed	PALL	43,90	82,30	20_TS-1

Figura 11.56. Diseño mecánico (internals) de la columna C-500 en Aspen Hysys.

Tal y como se puede observar en la **figura 11.56**, se ha diseñado una columna de 6 m de altura y 2 m de diámetro interno, siendo la relación entre estas de 3, siendo óptima mientras esté en un rango entre 3 y 10 ( $H/D = 3 - 10$ ).

Así mismo, se ha decidido que esta columna trabaje siempre a una misma sección en todas las etapas de equilibrio. Por otro lado, en la **figura 11.55**, se puede observar cómo se ha escogido empacado tipo Pall.

Por último, la siguiente **tabla 11.20** muestra los parámetros, como los resultados hidráulicos, geometría de la columna o características de los platos, del diseño obtenido para la columna de absorción C-500:

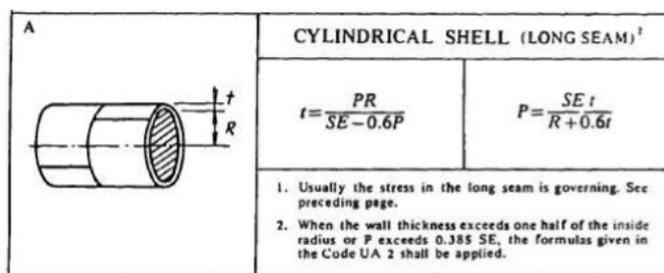
**Tabla 11.20.** Tabla de características y geometría de platos y parámetros hidráulicos de la columna C-500.

Geometría	
Diámetro (m)	2
Altura de empacado por etapa (m)	0,3
Altura (m)	6
Área transversal (m <sup>2</sup> )	3,5
Área activa (m <sup>2</sup> )	3,2
Características del empacado	
Tipo de empacado	Pall
Material del empacado	Metal
Proveedores	Genérico
Diámetro de del cabezal (mm)	38
Parámetros hidráulicos	
Máxima pérdida de presión por unidad de empacado (kPa/m)	1,41
Mínima pérdida de presión por unidad de empacado (kPa/m)	$4,09 \cdot 10^{-2}$
Mínimo caudal de líquido por área (m <sup>3</sup> /h·m <sup>2</sup> )	1,22

### 11.3.3.2.2 Espesor de columna y cabezales

#### Espesor de columna:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá la columna de absorción C-500 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.57**:



**Figura 11.57.** Fórmulas para el cálculo del espesor de la columna de absorción C-500.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.164 } t_{C-500} = \frac{P_{C-500} \cdot R_{int,C-500}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_{C-500}} + C_1 = \frac{50 \text{ atm} \cdot 1000 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 50 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 56,9 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{C-500}$  = espesor mínimo que tiene que tener la columna C – 500 (mm)

$P_{C-500}$  = presión de operación a la que trabaja la columna C – 500 (atm)

$R_{int,C-500}$  = radio interno de la columna C – 500 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

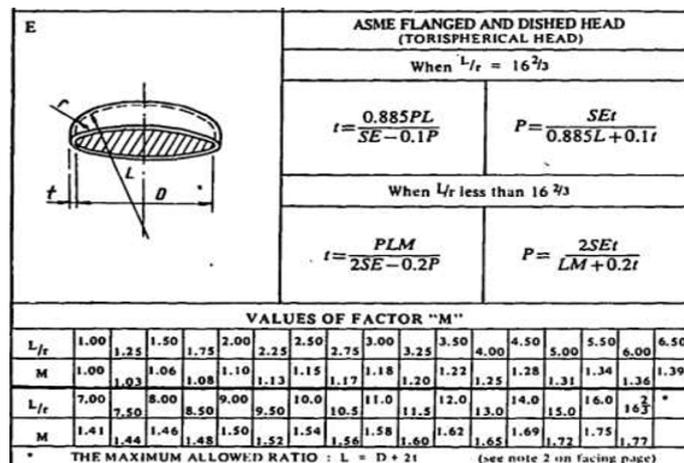
$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 40°C o 135°F y la presión de 50 atm, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.164**, se ha obtenido un grosor de unos 56,9mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 60mm, según los estándares en el mundo de la industria.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales de la columna de absorción C-500 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.58**:



**Figura 11.58.** Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales la columna de absorción C-500.

Dónde:

Si  $t_{C-500}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,C-500}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{C-500}/L = 4 \text{ mm}/2500 \text{ mm} \sim 0,002 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 2500 = 150 \text{ mm}$ ,  $L = 2500 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 2500 \text{ mm}/150 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.58**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

**Ecuación 11.165**  $t_{cab,C-500} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{SE - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 50 \text{ atm} \cdot 2000 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} - 0,1 \cdot 50 \text{ atm}} = 97,99 \text{ mm}$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$t_{cab,C-401'} = 1,1 \cdot t_{cab,C-401} = 1,1 \cdot 97,99 \text{ mm} = 100 \text{ mm}$

Por último, como los valores del espesor de los cabezales y el de la columna son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 100mm.

### 11.3.3.2.3 Altura de columna y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real de la columna en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,C-500} - 0,455 \cdot t_{cab,C-500} = 0,1935 \cdot 2000mm - 0,455 \cdot 100mm = 341,5mm$$

$$\text{Ecuación 11.166 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,C-500} = 3,5 \cdot 100 \text{ mm} = 350 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.167 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 341,5 \text{ mm} + 350 \text{ mm} = 691,5 \text{ mm} = 0,691 \text{ m}$$

Dónde:

$D_{int,C-500}$  = diámetro interno de la columna (mm)

$t_{cab,C-500}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,691 m, la altura real de la columna pasará a ser de 7,4 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.168 } H_{total,C-500} = H_{C-500} + 2 \cdot H_{cab,C-500} = 6 \text{ m} + 2 \cdot 0,691m = 7,39 \text{ m} = 7,4 \text{ m}$$

Dónde:

$H_{total,C-500}$  = altura total de la columna C – 500 (m)

$H_{C-500}$  = altura teórica de la columna C – 500 (m)

$H_{cab,C-500}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.3.3.3 Volumen y peso de la columna

#### 11.3.3.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos de la columna, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

##### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.169 } V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,C-500})^3 = 0,1 \cdot (2 \text{ m})^3 = 0,8 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{int,C-500}$  = diámetro interno de la columna (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.170 } V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,C-500})^3 = 0,1 \cdot (2,2\text{m})^3 = 1,06 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{ext,C-500}$  = diámetro externo de la columna (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.171 } V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 1,06 - 0,80 = 0,26 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

Volumen de columna:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.172 } V_{int,C-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,C-500})^2 \cdot H_{total,C-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (2)^2 \cdot 7,4 \text{ m} = 23,25 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-500} = \text{volumen interno de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{int,C-500} = \text{diámetro interno de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-500} = \text{altura total de la columna (m)}$$

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared de la columna:

$$\text{Ecuación 11.173 } V_{ext,C-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,C-500})^2 \cdot H_{total,C-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,2)^2 \cdot 7,4 \text{ m} = 28,13 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{ext,C-500} = \text{volumen externo de la columna (m}^3\text{)}$$

$$D_{ext,C-500} = \text{diámetro externo de la columna (m)}$$

$$H_{total,C-500} = \text{altura total de la columna (m)}$$

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de la columna será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.174 } V_{pared,C-500} = V_{ext,C-500} - V_{int,C-500} = 28,13 - 23,25 = 4,88 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,C-500} = \text{volumen interno de los cabezales (m}^3\text{)}$$

$$V_{ext,C-500} = \text{volumen externo de los cabezales (m}^3\text{)}$$

$$V_{pared,C-500} = \text{volumen de la pared de los cabezales (m}^3\text{)}$$

Por lo que, al final, el volumen total de la columna ocupada por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.175 } V_{pared \text{ columna}} = V_{pared,C-500} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 4,88 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,26 \text{ m}^3 = 5,40 \text{ m}^3$$

### 11.3.3.3.2 Peso de la columna

#### Peso de la columna vacía:

En este apartado se calculará el peso de la columna si ésta estuviera vacía de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener de la columna como los platos perforados. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de  $8000 \text{ kg/m}^3$ , **[18]** y **[8]**:

$$\text{Ecuación 11.176 } M_{C-500,vacia} = (V_{pared\ columna} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (5,40 \text{ m}^3 \cdot 8000 \text{ kg/m}^3) \cdot 1,1 = 47520 \text{ kg}$$

Dónde:

$M_{C-500,vacia}$  = peso de la columna vacía (kg)

$\rho_{acero\ 316L}$  = densidad del acero 316L ( $\text{kg/m}^3$ )

#### Peso de la columna en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso de la columna llena de agua, es necesario conocer el volumen total de la columna, que en este caso son  $23,25 \text{ m}^3$  de la columna más 2 veces el volumen del cabezal  $0,80 \text{ m}^3$ , dando un total de  $24,85 \text{ m}^3$ .

Por tanto, el peso de la columna llena de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.177 } M_{C-500,agua} = M_{C-500,vacia} + V_{columna} \cdot \rho_{agua} = 47520 \text{ kg} + 24,85 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 72370 \text{ kg} = 72,4 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-500,agua}$  = peso de la columna llena de agua (kg)

$\rho_{agua}$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

Peso de la columna en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada de la columna:

$$\text{Ecuación 11.178 } M_{C-500,op} = M_{C-500,vacía} + V_{columna} \cdot \rho_{mezcla} = 47520 \text{ kg} + 24,85 \text{ m}^3 \cdot 57,65 \text{ kg/m}^3 = 48952,60 \text{ kg} = 48,95 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{C-500,op}$  = peso de la columna con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\text{kg/m}^3$ )

11.3.3.4 Aislamiento de la columna

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en alguna parte de la columna, como es nuestro caso 45°C el corriente líquido de salida absorbido, es necesario implementar un aislante, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.179 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{\frac{1}{4}}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{45^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{2 \text{ m} \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 14,82 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la columna (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo de la columna (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12-15 cm, **[11]**, por lo que el grosor de 14,82 se aproximará a un grosor de 15 cm para unificar valores estándar hoy en día en la industria.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\text{Ecuación 11.180 } V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 50,49 \text{ m}^2 \cdot 0,1 \text{ m} = 5,05 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante ( $\text{m}^3$ )

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\text{Ecuación 11.181 } S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 41,47 \text{ m}^2 + 2 \cdot 4,51 \text{ m}^2 = 50,49 \text{ m}^2$$

$$\text{Ecuación 11.182 } S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 2,20 \text{ m} \cdot 6 \text{ m} = 41,47 \text{ m}^2$$

$$\text{Ecuación 11.183 } S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 2,20 \text{ m}^2 = 4,51 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,c}}$  = sección externa del cuerpo de la columna ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa de la columna ( $\text{m}^2$ )

## 11.4 Diseño de los tanques de separación gas-líquido

### 11.4.1 Tanque de separación gas-líquido T-300

#### 11.4.1.1 Diseño en Aspen Hysys

Para el diseño del tanque de separación T-300 se ha usado el programa Aspen Hysys, el cual, fijando los caudales de entrada y salida al tanque, nos proporciona valores de volumen, diámetro y altura tal y como se indica en las siguientes figuras:

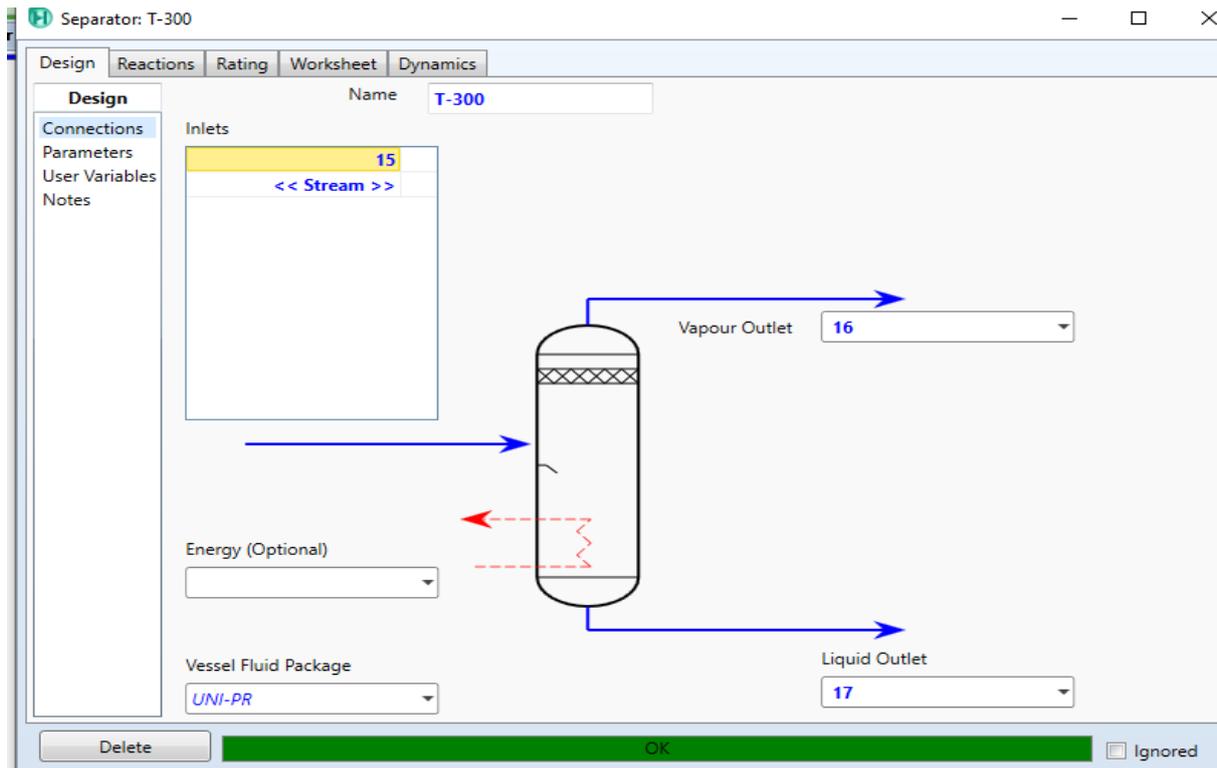


Figura 59. Conexiones de entrada y salida del tanque de separación gas-líquido T-300.

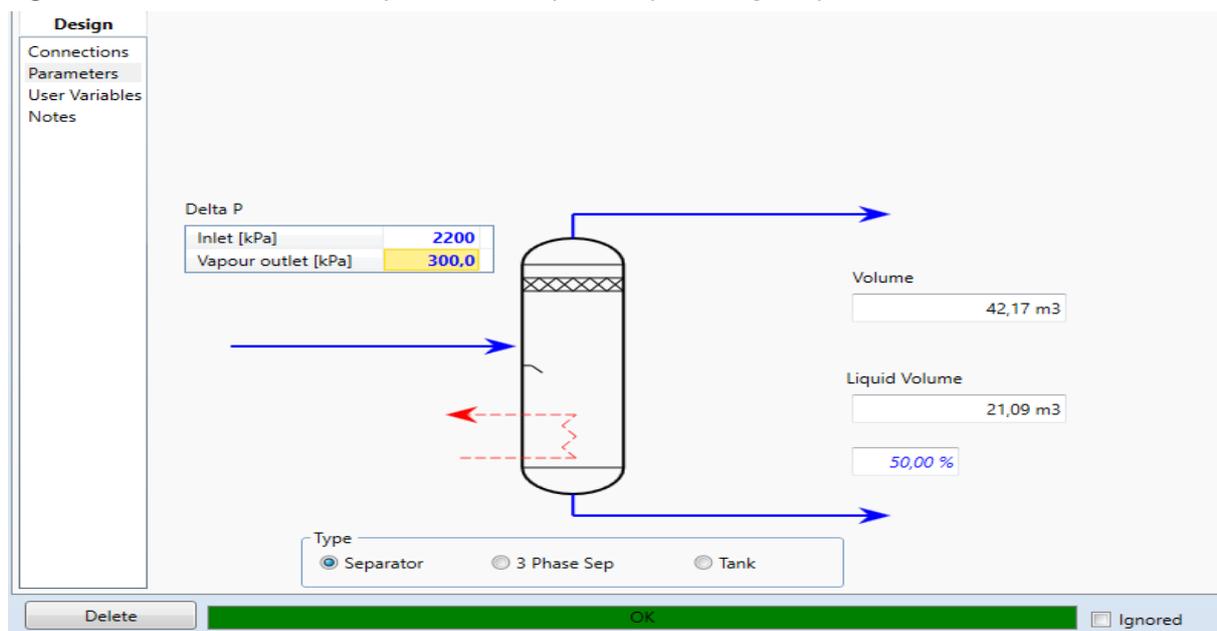
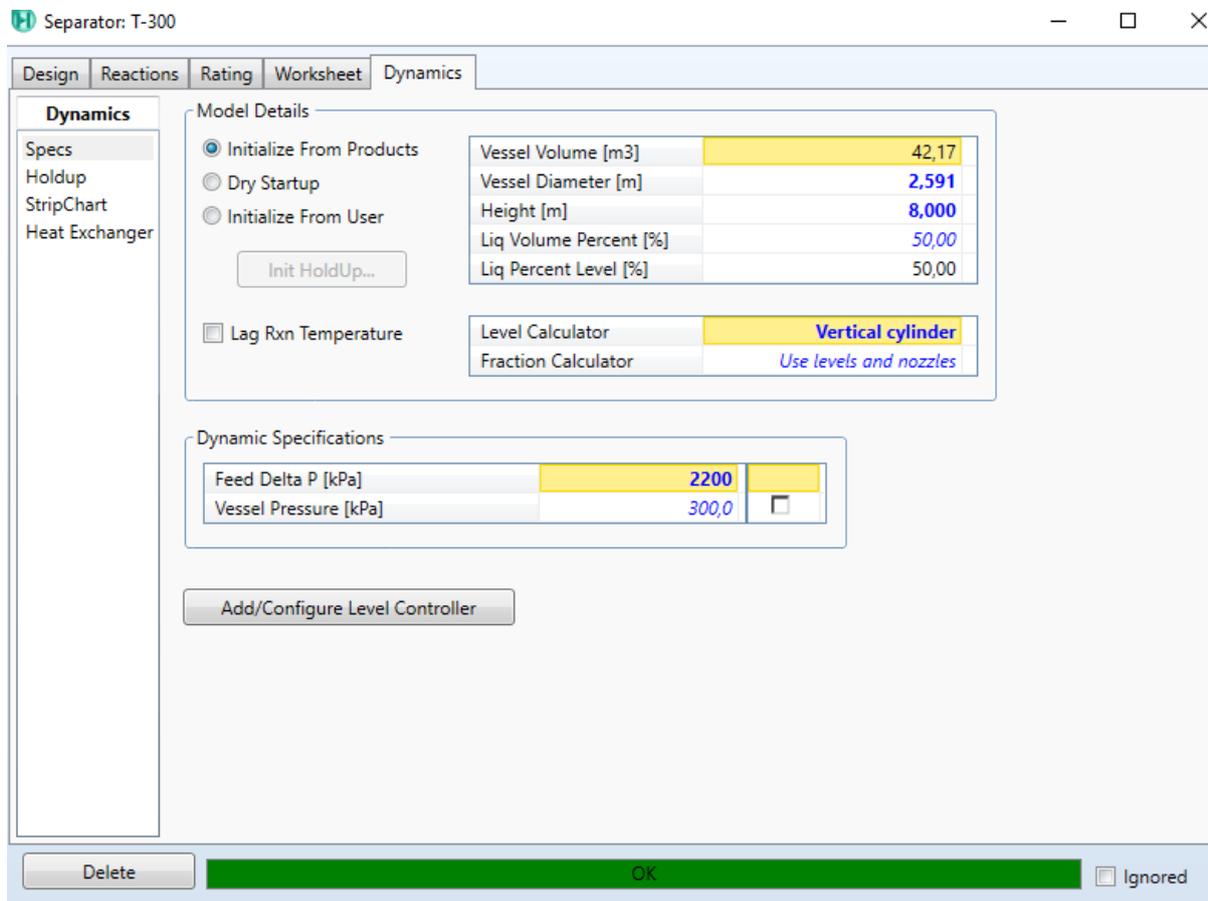


Figura 60. Parámetros de diseño (volumen, presión) del tanque de separación gas-líquido T-300.

Tal y como se puede observar en las **figuras 11.59 y 11.60**, el tanque de separación T-300 ha sido diseñado para tener 42 m<sup>3</sup> de volumen, ocupando así el líquido solo el 50% del equipo. Así mismo, se puede observar como la presión del líquido de entrada es de 3500 kPa y, la del gas de salida de cabeza del tanque, es de 300 kPa.



**Figura 11.61.** Especificaciones del tanque de separación gas-líquido T-300 diseñado con Aspen Hysys.

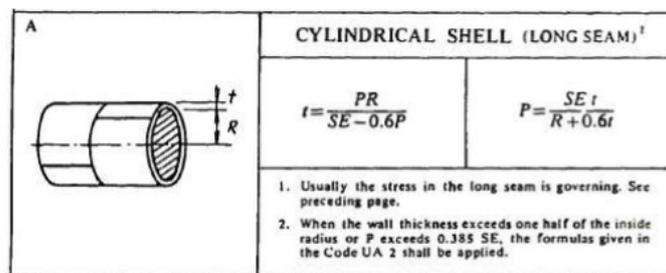
Por último, en la **figura 11.61** se pueden observar las especificaciones del tanque una vez diseñada y en función del volumen que ocupa. El tanque T-300 será un tanque de 2,5 m de diámetro y 8 m de altura, con un porcentaje de nivel del líquido del 50%.

#### 11.4.1.2 Diseño mecánico

##### 11.4.1.2.1 Espesor de torre y cabezales

###### Espesor del tanque:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá el tanque de separación T-300 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.62**:



**Figura 11.62.** Fórmulas para el cálculo del espesor del tanque de separación T-300.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.184 } t_{T-300} = \frac{P_{T-300} \cdot R_{int,T-300}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{T-300}} + C_1 = \frac{35 \text{ atm} \cdot 1250 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 35 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 34,9 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{T-300}$  = espesor mínimo que tiene que tener el tanque T – 300 (mm)

$P_{T-300}$  = presión de operación a la que trabaja el tanque T – 300 (atm)

$R_{int,T-300}$  = radio interno del tanque T – 300 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

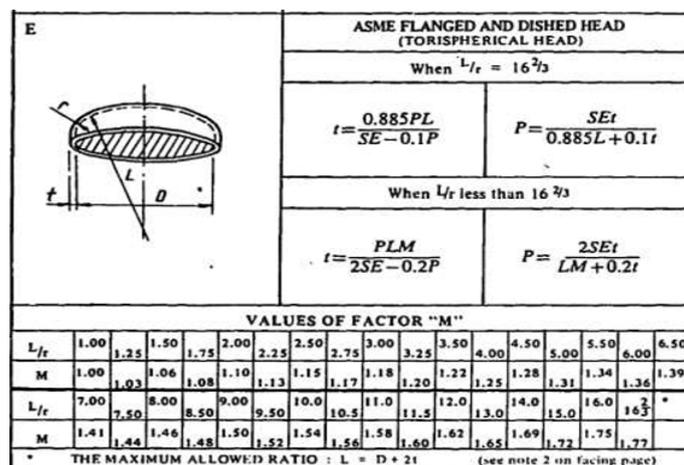
$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 90,5°C o 195°F y la presión de 35 atm, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.184**, se ha obtenido un grosor de unos 34,9 mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 35mm.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales del tanque de separación T-300 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.63**:



**Figura 11.63.** Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque de separación T-300.

Dónde:

Si  $t_{C-300}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,T-300}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{T-300}/L = 35 \text{ mm}/2500 \text{ mm} \sim 0,014 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 2500 = 150 \text{ mm}$ ,  $L = 2500 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 2500 \text{ mm}/150 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.63**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

**Ecuación 11.185**  $t_{cab,T-300} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 35 \text{ atm} \cdot 2500 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} - 0,85 - 0,1 \cdot 35 \text{ atm}} = 59,8 \text{ mm}$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$t_{cab,T-300'} = 1,1 \cdot t_{cab,T-300} = 1,1 \cdot 59,8 \text{ mm} = 65 \text{ mm}$

Por último, como los valores del espesor de los cabezales y el del tanque son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 65mm.

#### 11.4.1.2.2 Altura de torre y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real del tanque en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,T-300} - 0,455 \cdot t_{cab,T-300} = 0,1935 \cdot 2500mm - 0,455 \cdot 65mm = 454,17 mm$$

$$\text{Ecuación 11.186 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,T-300} = 3,5 \cdot 65 mm = 227,5 mm$$

$$\text{Ecuación 11.187 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 454,17 mm + 227,5 mm = 681,67 mm = 0,682 m$$

Dónde:

$D_{int,T-300}$  = diámetro interno del tanque (mm)

$t_{cab,T-300}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,682 m, la altura real del tanque pasará a ser de 9,5 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.188 } H_{total,T-300} = H_{T-300} + 2 \cdot H_{cab,T-300} = 8 m + 2 \cdot 0,682m = 9,36 m = 9,5 m$$

Dónde:

$H_{total,T-300}$  = altura total del tanque T – 300 (m)

$H_{T-300}$  = altura teórica del tanque T – 300 (m)

$H_{cab,T-300}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.4.1.3 Volumen y peso del tanque

#### 11.4.1.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos del tanque, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

#### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.189 } V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,T-300})^3 = 0,1 \cdot (2,5 \text{ m})^3 = 1,56 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{int,T-300}$  = diámetro interno del tanque (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.190 } V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,T-300})^3 = 0,1 \cdot (2,63 \text{ m})^3 = 1,82 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{ext,T-300}$  = diámetro externo del tanque (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.191 } V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 1,82 - 1,56 = 0,26 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

Volumen del tanque:

En primer lugar, se calcula el volumen interno del tanque de la torre:

$$\text{Ecuación 11.192 } V_{int,T-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,T-300})^2 \cdot H_{total,T-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,5)^2 \cdot 9,5 \text{ m} = 46,63 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,T-300} = \text{volumen interno del tanque (m}^3\text{)}$$

$$D_{int,T-300} = \text{diámetro interno del tanque (m)}$$

$$H_{total,T-300} = \text{altura total del tanque (m)}$$

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared del tanque:

$$\text{Ecuación 11.193 } V_{ext,T-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,T-300})^2 \cdot H_{total,T-300} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,63)^2 \cdot 9,5 \text{ m} = 51,61 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{ext,T-300} = \text{volumen externo del tanque (m}^3\text{)}$$

$$D_{ext,T-300} = \text{diámetro externo del tanque (m)}$$

$$H_{total,T-300} = \text{altura total del tanque (m)}$$

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de la torre será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.194 } V_{pared,T-300} = V_{ext,T-300} - V_{int,T-300} = 51,61 - 46,63 = 5 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,T-300} = \text{volumen interno del tanque (m}^3\text{)}$$

$$V_{ext,T-300} = \text{volumen externo del tanque (m}^3\text{)}$$

$$V_{pared,T-300} = \text{volumen de la pared del tanque (m}^3\text{)}$$

Por lo que, al final, el volumen total del tanque ocupado por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.195 } V_{pared \text{ torre}} = V_{pared,T-300} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 5 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,26 \text{ m}^3 = 5,52 \text{ m}^3$$

#### 11.4.1.3.2 Peso del tanque

##### Peso del tanque vacío:

En este apartado se calculará el peso del tanque si éste estuviera vacío de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener del tanque. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de 8000 kg/m<sup>3</sup>, [18] y [8]:

$$\text{Ecuación 11.196 } M_{T-300,vacia} = (V_{pared\ torre} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (5,52\ m^3 \cdot 8000\ kg/m^3) \cdot 1,1 = 48576\ kg$$

Dónde:

$M_{T-300,vacia}$  = peso del tanque vacío (kg)

$\rho_{acero\ 316L}$  = densidad del acero 316L (kg/m<sup>3</sup>)

##### Peso del tanque en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso del tanque lleno de agua, es necesario conocer el volumen total de la torre, que en este caso son 46,63 m<sup>3</sup> de la torre más 2 veces el volumen del cabezal 1,56 m<sup>3</sup>, dando un total de 49,75 m<sup>3</sup>.

Por tanto, el peso del tanque lleno de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.197 } M_{T-300,agua} = M_{T-300,vacia} + V_{torre} \cdot \rho_{agua} = 48576\ kg + 49,75\ m^3 \cdot 1000\ kg/m^3 = 98326\ kg = 98,33\ tn$$

Dónde:

$M_{T-300,agua}$  = peso del tanque lleno de agua (kg)

$\rho_{agua}$  = densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

Peso del tanque en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada del tanque:

$$\text{Ecuación 11.198 } M_{T-300,op} = M_{T-300,vacia} + V_{torre} \cdot \rho_{mezcla} = 48576 \text{ kg} + 49,75 \text{ m}^3 \cdot 953,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 96007,65 \text{ kg} = 96 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{T-300,op}$  = peso de la torre con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

11.4.1.4 Aislamiento del tanque

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en alguna parte del tanque, como es nuestro caso 90,5°C el corriente líquido de alimentación, es necesario implementar un aislante, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.199 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{\frac{1}{4}}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{90,5^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{2,63 \text{ m} \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 11,79 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del tanque (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo del tanque (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12 cm, [11], por lo que el grosor de 11,79 se aproximará a un grosor de 12 cm para unificar valores estándar hoy en día en la industria.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\textbf{Ecuación 11.200} \quad V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 78,98 \text{ m}^2 \cdot 0,12 \text{ m} = 9,48 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante ( $\text{m}^3$ )

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\textbf{Ecuación 11.201} \quad S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 66,10 \text{ m}^2 + 2 \cdot 6,44 \text{ m}^2 = 78,98 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.202} \quad S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 2,63 \text{ m} \cdot 8 \text{ m} = 66,10 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.203} \quad S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 2,63 \text{ m}^2 = 6,44 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,c}}$  = sección externa del cuerpo del tanque ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa del tanque ( $\text{m}^2$ )

## 11.4.2 Tanque de separación gas-líquido T-500

### 11.4.2.1 Diseño en Aspen Hysys

Para el diseño del tanque de separación T-500 se ha usado el programa Aspen Hysys, el cual, fijando los caudales de entrada y salida al tanque, nos proporciona valores de volumen, diámetro y altura tal y como se indica en las siguientes figuras:

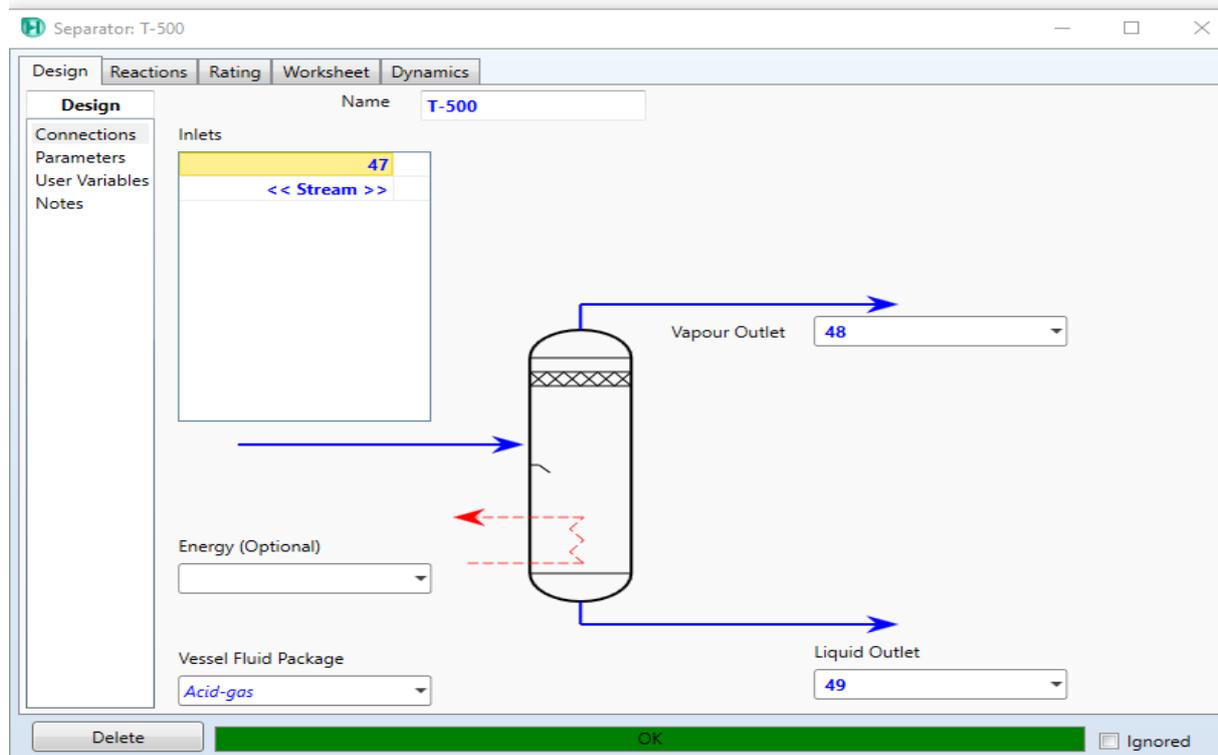


Figura 11.64. Conexiones de entrada y salida del tanque de separación gas-líquido T-500.

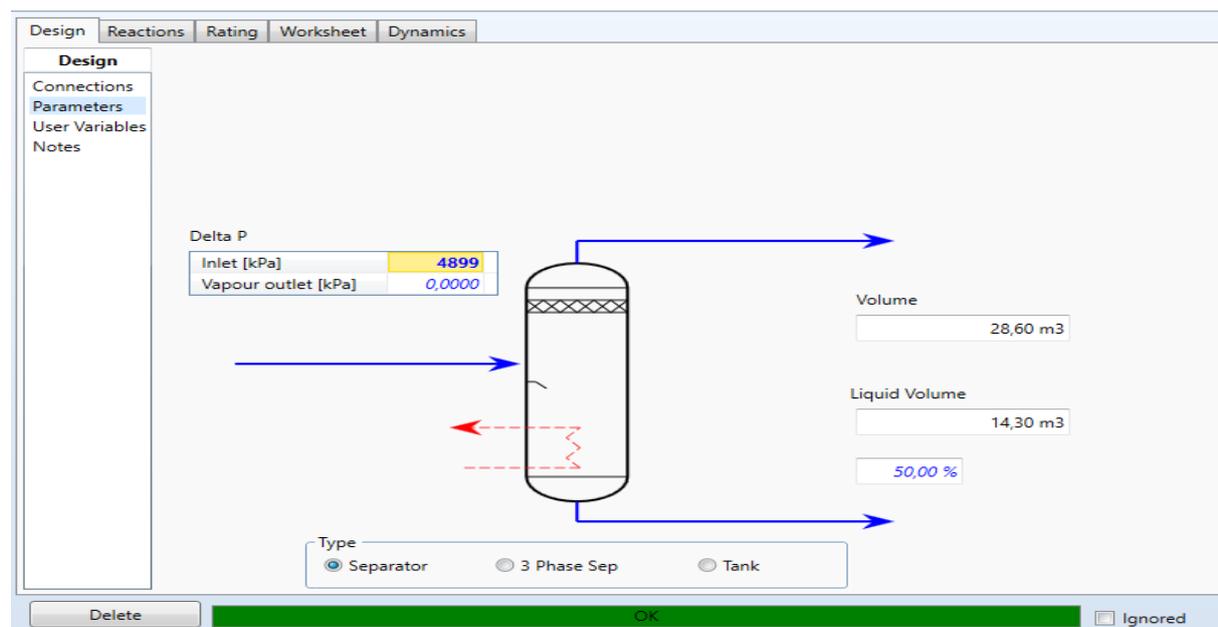
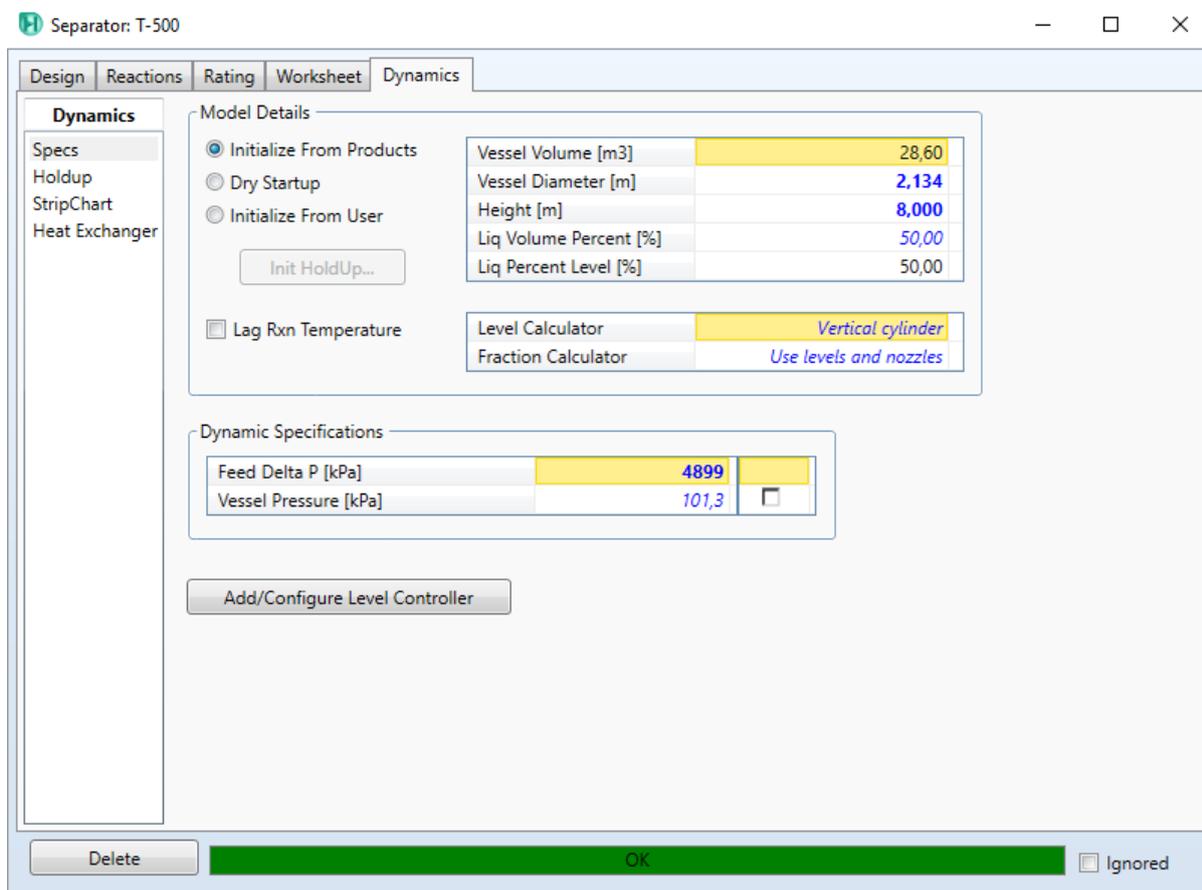


Figura 11.65. Parámetros de diseño (volumen, presión) del tanque de separación gas-líquido T-500.

Tal y como se puede observar en las **figuras 11.64 y 11.65**, el tanque de separación T-500 ha sido diseñado para tener 28,6 m<sup>3</sup> de volumen, ocupando así el líquido solo el 50% del equipo. Así mismo, se puede observar como la presión del líquido de entrada es de 5000 kPa y la del gas de salida de cabeza de tanque es atmosférico (101,3 kPa).



**Figura 11.66.** Especificaciones del tanque de separación gas-líquido T-500 diseñado con Aspen Hysys.

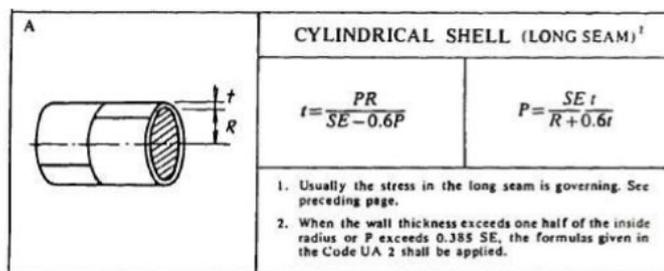
Por último, en la **figura 11.66** se pueden observar las especificaciones del tanque una vez diseñado y en función del volumen que ocupa. El tanque T-500 será un tanque de 2,1 m de diámetro y 8 m de altura, con un porcentaje de nivel del líquido del 50%.

### 11.4.2.2 Diseño mecánico

#### 11.4.2.2.1 Espesor de torre y cabezales

##### Espesor del tanque:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrá el tanque de separación T-500 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.67**:



**Figura 11.67.** Fórmulas para el cálculo del espesor del tanque de separación T-500.

Se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 11.204 } t_{T-500} = \frac{P_{T-500} \cdot R_{int,T-500}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{T-500}} + C_1 = \frac{49 \text{ atm} \cdot 1050 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 49 \text{ atm}} + 1,5 \text{ mm} \approx 59,5 \text{ mm}$$

Dónde:

$t_{T-500}$  = espesor mínimo que tiene que tener el tanque T – 500 (mm)

$P_{T-500}$  = presión de operación a la que trabaja el tanque T – 500 (atm)

$R_{int,T-500}$  = radio interno del tanque T – 500 (mm)

$S$  = esfuerzo del material (atm)

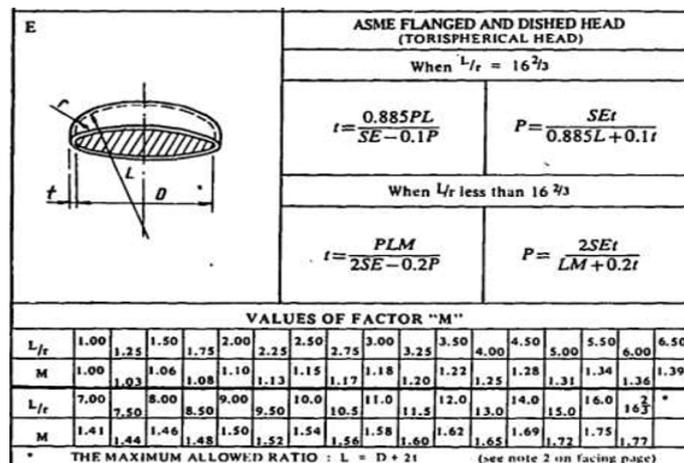
$E$  = factor de eficiencia de soldadura (~0,85)

Sabiendo que la temperatura máxima de diseño es de 48°C o 118°F y la presión de 49 atm, y según la **tabla 11.8**, para el acero 316L el valor del esfuerzo material será de 15,7 ksi o 1068,32 atm. Así mismo, seguiremos usando un valor de 1,5 mm para el coeficiente de corrosión estimado para una durabilidad de la planta de 15 años.

Tal y como se puede observar en la **ecuación 11.204**, se ha obtenido un grosor de unos 59,5 mm, pero, este valor, será sobredimensionado a 60mm.

Espesor de los cabezales:

En este apartado se procede a calcular el espesor aproximado que tendrán los cabezales del tanque de separación T-500 y que, tal y como se hacía con los reactores, seguirán las siguientes fórmulas según el código ASME y tal y como se observa en la **figura 11.68**:



**Figura 11.68.** Fórmulas para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque de separación T-500.

Dónde:

Si  $t_{c-500}/L \geq 0,002$  entonces:  $r = 0,06 \cdot L$  y  $L = D_{int,T-500}$

Según nuestros valores, la relación  $t_{T-500}/L = 60 \text{ mm}/2100 \text{ mm} \sim 0,029 \geq 0,002$  por lo que  $r = 0,06 \cdot 2100 = 126 \text{ mm}$ ,  $L = 2100 \text{ mm}$  y la relación  $L/r = 2100 \text{ mm}/126 \text{ mm} = 16,66$  y según la **figura 11.68**, la fórmula para calcular el espesor será la siguiente:

**Ecuación 11.205**  $t_{cab,T-500} = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} = \frac{0,885 \cdot 49 \text{ atm} \cdot 2100 \text{ mm}}{1068,32 \text{ atm} - 0,85 - 0,1 \cdot 49 \text{ atm}} = 100 \text{ mm}$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de los cabezales. De esta manera el espesor pasará a ser:

$t_{cab,T-300r} = 1,1 \cdot t_{cab,T-300} = 1,1 \cdot 100 \text{ mm} = 110 \text{ mm}$

Por último, como los valores del espesor de los cabezales y el del tanque son diferentes, se decide unificar los dos al espesor mayor, en este caso, 110mm.

#### 11.4.2.2.2 Altura de tanque y cabezales

En este apartado se procede a determinar la altura real del tanque en función del cálculo de la altura de los cabezales y esto se ha realizado a partir de las ecuaciones de proporcionadas por la página web de la empresa König+co, proveedora de cabezales de los equipos, [14]:

$$h_1 = 0,1935 \cdot D_{int,T-500} - 0,455 \cdot t_{cab,T-500} = 0,1935 \cdot 2100mm - 0,455 \cdot 110mm = 356,3 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.206 } h_2 = 3,5 \cdot t_{cab,T-500} = 3,5 \cdot 110 \text{ mm} = 385 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.207 } H_{cab} = h_1 + h_2 = 356,3 \text{ mm} + 385 \text{ mm} = 741,3 \text{ mm} = 0,741 \text{ m}$$

Dónde:

$D_{int,T-500}$  = diámetro interno del tanque (mm)

$t_{cab,T-500}$  = espesor de cabezales toriesféricos (mm)

$H_{cab}$  = altura de los cabezales (mm)

Por tanto, si se ha encontrado una altura de cabezales de 0,741 m, la altura real del tanque pasará a ser de 9,5 m según la ecuación siguiente:

$$\text{Ecuación 11.208 } H_{total,T-500} = H_{T-500} + 2 \cdot H_{cab,T-500} = 8 \text{ m} + 2 \cdot 0,741\text{m} = 9,48 \text{ m} = 9,5 \text{ m}$$

Dónde:

$H_{total,T-500}$  = altura total de la torre T – 500 (m)

$H_{T-500}$  = altura teórica de la torre T – 500 (m)

$H_{cab,T-500}$  = altura de los cabezales (m)

### 11.4.2.3 Volumen y peso del tanque

#### 11.4.2.3.1 Volumen de pared

Antes de proceder a los cálculos de los diferentes pesos del tanque, es necesario conocer el volumen de su pared en total.

#### Volumen de los cabezales:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.209 } V_{int,cab} = 0,1 \cdot (D_{int,T-500})^3 = 0,1 \cdot (2,1 \text{ m})^3 = 0,93 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{int,T-500}$  = diámetro interno del tanque (m)

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$\text{Ecuación 11.210 } V_{ext,cab} = 0,1 \cdot (D_{ext,T-500})^3 = 0,1 \cdot (2,32\text{m})^3 = 1,25 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$D_{ext,T-500}$  = diámetro externo del tanque (m)

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno de cabezales será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.211 } V_{pared,cab} = V_{ext,cab} - V_{int,cab} = 1,25 - 0,93 = 0,32 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{int,cab}$  = volumen interno de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{ext,cab}$  = volumen externo de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

$V_{pared,cab}$  = volumen de la pared de los cabezales ( $\text{m}^3$ )

Volumen del tanque:

En primer lugar, se calcula el volumen interno de la pared del tanque:

$$\text{Ecuación 11.212 } V_{int,T-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{int,T-500})^2 \cdot H_{total,T-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,1)^2 \cdot 9,5 \text{ m} = 32,90 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,T-500} = \text{volumen interno del tanque (m}^3\text{)}$$

$$D_{int,T-500} = \text{diámetro interno del tanque (m)}$$

$$H_{total,T-500} = \text{altura total del tanque (m)}$$

En segundo lugar, se calcula el volumen externo de la pared del tanque:

$$\text{Ecuación 11.213 } V_{ext,T-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,T-500})^2 \cdot H_{total,T-500} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,32)^2 \cdot 9,5 \text{ m} = 40,16 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{ext,T-500} = \text{volumen externo del tanque (m}^3\text{)}$$

$$D_{ext,T-500} = \text{diámetro externo del tanque (m)}$$

$$H_{total,T-500} = \text{altura total del tanque (m)}$$

Por tanto, la diferencia entre el volumen externo e interno del tanque será el volumen que ocupe su pared:

$$\text{Ecuación 11.214 } V_{pared,T-500} = V_{ext,T-500} - V_{int,T-500} = 40,16 - 32,90 = 7,26 \text{ m}^3$$

Dónde:

$$V_{int,T-500} = \text{volumen interno del tanque (m}^3\text{)}$$

$$V_{ext,T-500} = \text{volumen externo del tanque (m}^3\text{)}$$

$$V_{pared,T-500} = \text{volumen de la pared del tanque (m}^3\text{)}$$

Por lo que, al final, el volumen total del tanque ocupado por su pared pasa a ser:

$$\text{Ecuación 11.215 } V_{pared\ torre} = V_{pared,T-500} + 2 \cdot V_{pared,cab} = 7,26 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,32 \text{ m}^3 = 7,9 \text{ m}^3$$

#### 11.4.2.3.2 Peso del tanque

##### Peso del tanque vacío:

En este apartado se calculará el peso del tanque si ésta estuviera vacía de la siguiente manera, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 10% por los elementos internos que pueda tener del tanque. Así mismo, teniendo en cuenta que la densidad del acero 316L es de 8000 kg/m<sup>3</sup>, [18] y [8]:

$$\text{Ecuación 11.216 } M_{T-500,vacia} = (V_{pared\ torre} \cdot \rho_{acero\ 316L}) \cdot 1,1 = (7,9\ m^3 \cdot 8000\ \frac{kg}{m^3}) \cdot 1,1 = 69.520\ kg$$

Dónde:

$$M_{T-500,vacia} = \text{peso del tanque vacío (kg)}$$

$$\rho_{acero\ 316L} = \text{densidad del acero 316L (kg/m}^3\text{)}$$

##### Peso del tanque en prueba:

Para proceder con el cálculo del peso del tanque lleno de agua, es necesario conocer el volumen total del tanque, que en este caso son 32,9 m<sup>3</sup> del tanque más 2 veces el volumen del cabezal 0,32 m<sup>3</sup>, dando un total de 33,5 m<sup>3</sup>.

Por tanto, el peso del tanque lleno de agua será el que a continuación se calcula:

$$\text{Ecuación 11.217 } M_{T-500,agua} = M_{T-500,vacia} + V_{torre} \cdot \rho_{agua} = 69520\ kg + 33,5\ m^3 \cdot 1000\ \frac{kg}{m^3} = 103020\ kg = 103,02\ tn$$

Dónde:

$$M_{T-500,agua} = \text{peso del tanque lleno de agua (kg)}$$

$$\rho_{agua} = \text{densidad del agua (kg/m}^3\text{)}$$

Peso del tanque en operación:

En este apartado se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido proporcionado por Hysys a la entrada del tanque:

$$\text{Ecuación 11.218 } M_{T-500,op} = M_{T-500,vacia} + V_{torre} \cdot \rho_{mezcla} = 69520 \text{ kg} + 33,5 \text{ m}^3 \cdot 1012,48 \text{ kg/m}^3 = 103.438,08 \text{ kg} = 103,44 \text{ tn}$$

Dónde:

$M_{T-500,op}$  = peso del tanque con la mezcla de alimentación (kg)

$\rho_{mezcla}$  = densidad de la mezcla de alimentación ( $\text{kg/m}^3$ )

#### 11.4.2.4 Aislamiento de tanque

En caso de trabajar a temperaturas elevadas en alguna parte del tanque, como es nuestro caso 48°C el corriente líquido de alimentación, es necesario implementar un aislante, que en este caso se decide usar lana de roca para ello.

Así mismo, el espesor que requiere el aislante usado de lana de roca se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.219 } t_{aislante} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}}\right)^{1/4}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{48^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{2,32 \text{ m} \cdot 100}\right)^{1/4}} = 14,85 \text{ cm de espesor}$$

Dónde:

$t_{aislante}$  = espesor del aislante de lana de roca (cm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del tanque (°C)

$D_{ext,c}$  = diámetro externo del tanque (cm)

No obstante, los valores típicos de grosores suelen ser de 8 -10 -12-15 cm, **[11]**, por lo que el grosor de 14,85 se aproximará a un grosor de 15 cm para unificar valores estándar hoy en día en la industria.

Por último, el volumen total de aislante a utilizar se calcula de la manera siguiente:

$$\textbf{Ecuación 11.220 } V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,total}} \cdot t_{\text{aislante}} = 62,63 \text{ m}^2 \cdot 0,15 \text{ m} = 9,39 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_{\text{aislante}}$  = volumen del aislante ( $\text{m}^3$ )

$t_{\text{aislante}}$  = espesor del aislante (m)

$$\textbf{Ecuación 11.221 } S_{\text{ext,total}} = S_{\text{ext,c}} + 2 \cdot S_{\text{cabez}} = 58,31 \text{ m}^2 + 2 \cdot 2,16 \text{ m}^2 = 62,63 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.222 } S_{\text{ext,c}} = \pi \cdot D_{\text{ext,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 2,32 \text{ m} \cdot 8 \text{ m} = 58,31 \text{ m}^2$$

$$\textbf{Ecuación 11.223 } S_{\text{cabez}} = 0,931 \cdot D_{\text{ext,c}}^2 = 0,931 \cdot 2,32 \text{ m}^2 = 2,16 \text{ m}^2$$

$S_{\text{cabez}}$  = sección externa de los cabezales ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,c}}$  = sección externa del cuerpo del tanque ( $\text{m}^2$ )

$S_{\text{ext,total}}$  = sección externa del tanque ( $\text{m}^2$ )

## 11.5 Diseño de intercambiadores de calor

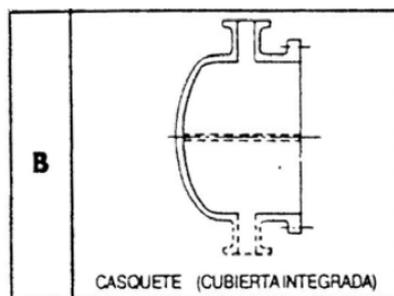
Para conseguir la temperatura necesaria de algunas de las corrientes del proceso es necesario utilizar intercambiadores de calor. Para realizar un diseño riguroso de estos se ha utilizado el programa *Aspen Exchanger Design and Rating V10*, definiéndose previamente el tipo de intercambiador a utilizar, los fluidos refrigerantes o calefactores, las características de tubos y carcasa, entre otros. Dicho programa se basa en las normas TEMA y el código ASME Code Sec VIII Div 1 para el diseño riguroso de los intercambiadores de calor.

### 11.5.1 Elección de tipo de intercambiadores

Los intercambiadores elegidos han sido los de tubos y carcasa ya que esta configuración es una de las más usadas tradicionalmente por su buen funcionamiento y versatilidad. Este tipo de intercambiadores se adaptan tanto a bajas como a altas presiones y temperaturas y también son capaces de trabajar con fluidos corrosivos. Además, son compactos y eficientes y se pueden utilizar para prácticamente cualquier intercambio entre dos fluidos, incluyendo aquellos con cambio de fase. También pueden ser construidos de diversos materiales y tipos dependiendo de las condiciones del proceso y sus costes de mantenimiento son bajos.

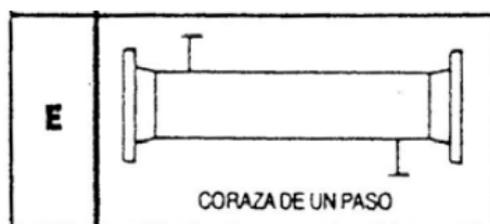
Para la definición y clasificación de los intercambiadores tubulares se siguen las normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association). Los estándares TEMA son aceptados mundialmente como la autoridad en el diseño y fabricación de intercambiadores de calor de carcasa y tubos. De acuerdo con estas normativas cada una de las secciones del intercambiador se identifica con una letra dependiendo de su forma y características, de modo que los intercambiadores se identifican por 3 letras. La primera letra designa el tipo de cabezal frontal, la segunda el tipo de carcasa y la tercera el tipo de cabezal posterior. Los intercambiadores elegidos para la planta de ETHOXID han sido los TEMA tipo BEP.

La B del tipo de TEMA hace referencia a intercambiadores de cabezal estacionario frontal tipo casquete atornillado o integral con placa de tubos (Bonnet), y han sido elegidos ya que además de ser el tipo más barato de encabezado frontal son también los más adecuados para tareas de alta presión ya que tienen un solo sello. En la **Figura 11.69** se puede apreciar un cabezal frontal tipo B como los utilizados en los intercambiadores de ETHOXID.



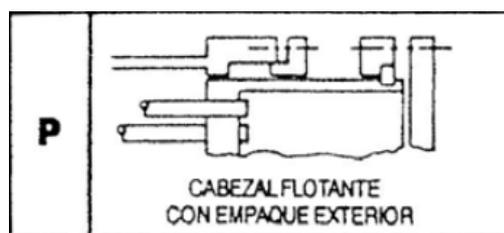
*Figura 11.69* Cabezal frontal tipo B.

Los intercambiadores de la planta ETHOXID son de un paso por carcasa, por lo que se han elegido carcasas TEMA tipo E. Además, los fluidos que circularán por las carcasas son agua, vapor de agua y aceite térmico y este tipo de carcasas son utilizadas para fluidos comunes como estos. Este es el tipo de carcasa más utilizado y es adecuado para la mayoría de las tareas y aplicaciones. Otros tipos de carcasa tienden a utilizarse solo para aplicaciones especiales. En la *Figura 11.70* se puede apreciar una carcasa tipo E.



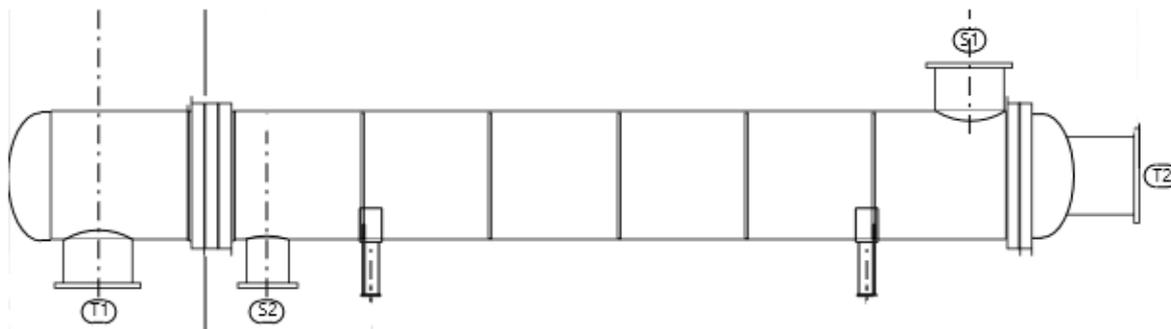
*Figura 11.70* Carcasa tipo E.

El cabezal posterior tipo P, es de tipo flotante con empaque exterior. Este tipo de cabezal ha sido elegido ya que son de bajo coste y su diseño permite la fácil extracción, inspección y limpieza de la carcasa y tubos. También se evitan mezclas de fluidos y permiten la expansión térmica diferencial entre la carcasa y el haz de tubos (si el haz de tubos se expande o contrae bajo la influencia de diferenciales de temperatura severos, el intercambiador sería capaz de soportarlo), el haz de tubos se puede reparar o reemplazar sin alterar la tubería de la carcasa. En la *Figura 11.71* se puede apreciar un cabezal posterior tipo P.



*Figura 11.71* Cabezal posterior tipo P.

En resumen, los intercambiadores tipo BEP han sido elegidos ya que se ajustan a las condiciones de operación de la planta y a los fluidos que circularán por ellos, además de que tienen ventajas sobre otros intercambiadores para las condiciones de trabajo de la planta ETHOXID, son más fáciles de reparar y limpiar y tienen un menor coste que otros tipos TEMA de intercambiadores. En la siguiente imagen se puede apreciar el esquema de uno de los intercambiadores BEP de la planta.



**Figura 11.72** Intercambiador E-200 de la planta ETHOXID, tipo BEP. S1 es la entrada de carcasa y S2 la salida de carcasa. T1 y T2 son la entrada y salida de tubos respectivamente.

### 11.5.2 Elección de fluidos transmisores de calor

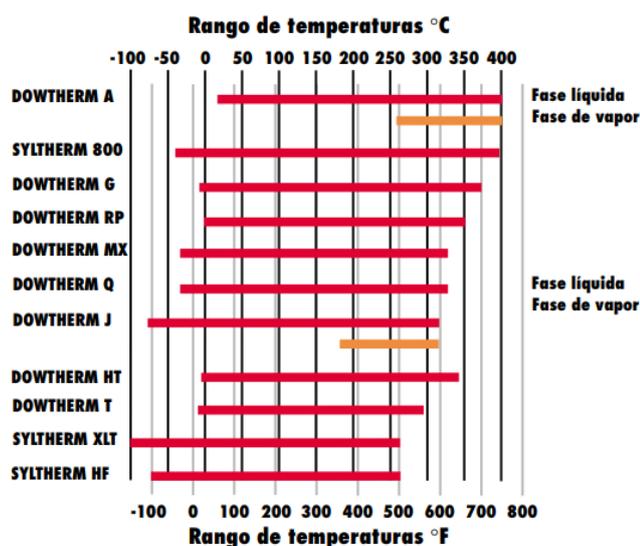
En la planta ETHOXID se utiliza agua como fluido refrigerante y vapor de agua y fluido sintético orgánico DOWTHERM-A como fluidos térmicos. Todos los fluidos transmisores de calor serán circulados continuamente desde el área de servicios a las áreas donde se encuentren los intercambiadores de calor donde sean necesarios, y al salir de los intercambiadores de calor serán recirculados al área de servicios para su tratamiento y acondicionamiento para posteriormente volver a utilizarse.

El agua es uno de los fluidos caloportadores más utilizados en procesos de la industria química en los cuales se requiera una transferencia térmica. Se ha elegido como fluido refrigerante ya que es un fluido ecológico y no hay riesgo de daño medioambiental ante una fuga, ni costes añadidos por utilización de fluidos refrigerantes industriales, además permite una gran flexibilidad en cuanto a diseño y futuras ampliaciones o modificaciones. El agua utilizada en los intercambiadores estará a 5°C y 25°C. El agua a 5°C provendrá del Chiller del área de servicios (A-1000) y el agua a 25°C de las torres de refrigeración de la misma área. Se tiene el caso especial del intercambiador E-301 el cual necesita enfriar el fluido de proceso de 407.7°C a 90.2°C y por lo tanto se utiliza como refrigerante una parte del agua a 79°C que sale del intercambiador E-300.

La presión de circulación del agua a 5°C será de 5 bar y la del agua a 25°C de 3 bar, esto con el fin de incrementar la temperatura de ebullición del agua y que no vaporice parte de ésta al pasar por el intercambiador, teniendo así agua en la entrada y salida del intercambiador y facilitado la circulación de dicho fluido por tuberías.

Uno de los fluidos térmicos que se ha seleccionado es el vapor de agua, esto es debido a que tiene facilidad de regulación, esterilidad, es seguro y tiene un gran poder calorífico. Se suministra a los intercambiadores de calor agua en estado gaseoso y cambia dentro de ellos a estado líquido (condensado), abandonándolo como agua que es recirculada a la caldera de vapor del área de servicios. Primeramente, se han diseñado los intercambiadores con vapor a presión atmosférica y posteriormente con vapor a una presión de 15.55 bar y estos últimos han tenido ventajas con respecto al vapor a presión atmosférica como menor área de intercambio necesaria y menor caudal de vapor requerido, por lo tanto, se ha decidido trabajar con vapor a 200°C y 15.55 bar.

El otro fluido térmico utilizado es el aceite sintético orgánico DOWTHERM-A, el cual se utiliza para el intercambiador E-200. En este intercambiador se requiere calentar los gases del proceso de 99.23°C a 270 °C para entrar al reactor. Este es un intercambiador de suma importancia ya que si los reactivos entran a otra temperatura podría verse afectada la conversión en el reactor y por lo tanto el resto del proceso. De esta manera, se utiliza DOWTHERM-A ya que es un fluido con una excelente estabilidad térmica para procesos a altas temperaturas, tienen una larga vida útil y economía operativa óptima. Tiene una gama de temperaturas de operación en fase vapor de 250°C y hasta 400°C, como se puede observar en la **Figura 11.73**.



**Figure 11.73.** Rangos de temperaturas de trabajo de diferentes fluidos DOWTHERM, entre los cuales se encuentra el utilizado DOWTHERM-A.

Este fluido es suministrado a ETHOXID en forma líquida en barriles por DOW Chemical Ibérica y es convertido a gas en la caldera de aceite térmico diseñada en el **apartado 11.10.1.2**, este gas es suministrado al intercambiador E-200 a 378°C y presión de vapor y al pasar por el intercambiador cambiará de fase. El fluido en forma líquida que abandona el intercambiador será recirculado a su respectiva caldera.

Se ha escogido trabajar con el fluido térmico en fase vapor ya que el coste en general al trabajar con el fluido en forma líquida y gas no difiere significativamente, por lo tanto, se han tomado en cuenta otras ventajas de trabajar con DOWTHERM-A en forma vapor condensante, entre las cuales se encuentran:

- Sistemas de fase vapor proveen más calor por unidad de masa que los sistemas en fase líquida.
- Los sistemas en fase vapor con condensación de este, proporcionan una fuente de calor más uniforme y un control más preciso de la temperatura por el usuario, lo cual como se ha mencionado antes es de especial importancia en este intercambiador.
- Un sistema equivalente al que se tiene en la planta ETHOXID, pero en fase líquida requería caudales más elevados del fluido térmico para mantener la misma uniformidad de temperaturas
- El calentamiento se puede lograr de manera más económica con vapor de condensación que con líquido a un alto caudal másico.

### 11.5.3 Definición del fluido que circula por tubos

La elección del fluido que circula por el interior de los tubos depende de diversos factores relacionados con las propiedades de los fluidos y sus condiciones de operación. La dificultad de esta selección está en llegar a un compromiso satisfactorio para poder cumplir con todos los requisitos o al menos la mayoría de estos. Para realizar la elección correcta se evalúan los siguientes factores:

#### Corrosión

El fluido que circule por el intercambiador y que se considere más corrosivo frente a los materiales utilizados para su construcción deberá situarse en el interior de los tubos para evitar elevar el coste de aleación de la carcasa.

### Temperatura

Se recomienda que el fluido con mayor temperatura circule por el lado de tubos debido a que las altas temperaturas reducen las tensiones permitidas en los materiales. En el caso de que el fluido con mayor temperatura circule por el lado de carcasa, deberá de realizarse una elección de material cuyas propiedades no se vean afectadas de manera importante por la temperatura de trabajo.

### Presión

La presencia de altas presiones en el lado de la carcasa obligaría a grandes espesores de pared, lo cual llevaría un aumento del coste, Por lo tanto, el fluido que trabaje a mayor presión debe estar situado en el interior de los tubos,

### Limpieza

La carcasa y parte exterior de los tubos son más difíciles de limpiar que el interior de los tubos, por lo que el fluido más limpio debe circular por el lado de la carcasa.

### Caudales

En general es mejor situar el fluido que tiene menor caudal en el lado de la carcasa para evitar la construcción de múltiples pasos por carcasa, lo que complicaría la construcción y para favorecer el flujo turbulento, más fácil de conseguir en la carcasa que en el interior de los tubos.

### Presión

La caída de presión en el interior de los tubos es más fácil de predecir que en la carcasa, por lo que, si para uno de los fluidos es crítica y debe conocerse con precisión, este fluido debe situarse en el interior de los tubos.

La evaluación de todos los factores mencionados se ha realizado cuidadosamente y para cada intercambiador dependiendo de los fluidos que circulan por ellos y las condiciones a las que estos se encuentran, determinando si en algún caso alguno de los criterios es restrictivo y valorando el peso de cada factor frente a los demás para cada tipo de aplicación.

De esta manera se decide que el fluido que circulará por tubos será el proveniente del proceso, y los fluidos refrigerantes o calefactores circularán por carcasa. Esta elección se justifica ya que:

- En cuanto a corrosión, las corrientes de mezclas de gases o líquidos del proceso son más corrosivas que los fluidos que se utilizarán para calentar o enfriar (agua, vapor de agua, aceite térmico).

- En cuanto a presión, en general, las corrientes de proceso trabajarán a altas presiones o presiones superiores a la atmosférica, en cambio los fluidos refrigerantes y térmicos circularán a presiones atmosférica o a presiones próximas a la atmosférica.
- Como se ha mencionado antes, los coeficientes de ensuciamiento también son mayores para las corrientes del proceso que para el agua, vapor de agua o fluido térmico y, por lo tanto, en cuanto a este factor concierne, es conveniente que las corrientes del proceso circulen por tubos.
- En cuanto a caudales, el caudal de refrigerante o fluido calefactor no será muy diferente al del fluido que viene del proceso, sin embargo, en todos los casos será menor y por lo tanto convendrá que le refrigerante o calefactor circule por carcasa.
- En cuanto a temperatura, podría esperarse que, en los intercambiadores para calentar, el fluido calefactor circulase por tubos, pero al no cumplirse todos los demás factores se ha llegado a un compromiso en el cual el factor temperatura sería el único que no se cumpliría. Sin embargo, el material de construcción de la carcasa es acero inoxidable 316L, el cual es capaz de soportar temperaturas de hasta 870°C y por lo tanto no existen inconvenientes de que el fluido de proceso circule por tubos a pesar de estar a una menor temperatura que el fluido calefactor.

#### 11.5.4 Coeficientes de ensuciamiento (fouling)

Para poder diseñar correctamente los intercambiadores con la herramienta *Aspen Exchanger*, uno de los parámetros requeridos a introducir es el coeficiente de ensuciamiento de los fluidos que circulan por el intercambiador. Para los intercambiadores de la planta ETHOXID se han tomado como referencia los coeficientes de las **Figuras 11.74 y 11.75**.

COOLING WATER - Fouling Factors in [m <sup>2</sup> K/W]				
Conditions	cooling water < 50 ° C cooled fluid < 120 ° C		cooling water > 50 ° C cooled fluid > 120 ° C	
	v < 1 m/s	v > 1 m/s	v < 1 m/s	v > 1 m/s
<b>Type of Water</b>				
Sea	0.00009	0.00009	0.00018	0.00018
Brackish	0.00035	0.00018	0.00053	0.00035
Cooling tower with inhibitor	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
Cooling tower without inhibitor	0.00053	0.00053	0.00088	0.00070
City grid	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
River mimimum	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
River average	0.00053	0.00035	0.00070	0.00035
Engine jacket	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018
Deminerlized or distilled	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009
Treated Boiler Feedwater	0.00018	0.00009	0.00018	0.00018
Boiler blowdown	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035

Figure 11.74 Factores de ensuciamiento de diferentes tipos de agua de refrigeración.

SEVERAL FLUIDS - Fouling Factors in [m <sup>2</sup> K/W]		
Group	Fluid	Fouling Factor
<b>Oil</b>	Gasoil	0.00009
	Transformer	0.00018
	Lubrication	0.00018
	Heat Transfer oil	0.00018
	Hydraulic	0.00018
<b>Gas and Vapour</b>	Hydrogen	0.00176
	Engine exhaust	0.00176
	Steam	0.00009
	Steam with oiltraces	0.00018
	Cooling fluid vapours with oil traces	0.00035
	Organic solvent vapours	0.00018
	Compressed air	0.00035
	Natural gas	0.00018
	Stable top products	0.00018

Figure 11.75. Factores de ensuciamiento de diversos fluidos.

De acuerdo con la **Figura 11.74** se escoge el valor para el coeficiente de ensuciamiento del agua de enfriamiento de 0.00009 m<sup>2</sup>K/W ya que esta pasará previamente por un tratamiento en el Área 900 y será agua desmineralizada.

Para el vapor y el DOWTHERM-A se escogen los coeficientes de *steam* (vapor) y *heat tranfer oil* (aceite de transferencia de calor) de la **Figura 11.75**, siendo ambos de 0.00018 m<sup>2</sup>K/W.

Para los fluidos de proceso que circulan por tubos el coeficiente de ensuciamiento será de igual manera de 0.00018 m<sup>2</sup>K/W.

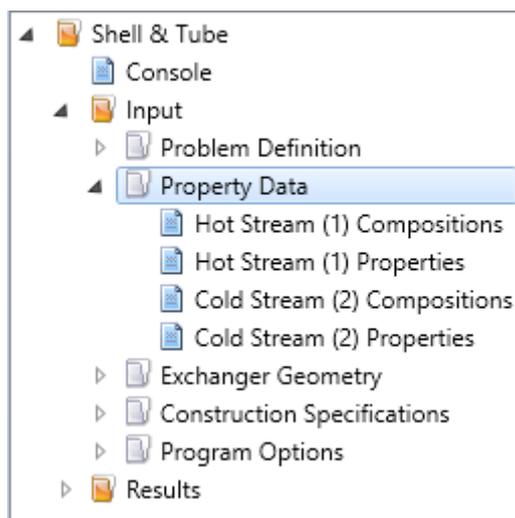
### 11.5.5 Diseño con Aspen Exchanger Design and Rating V10

Una vez definidos todos los parámetros anteriores se procede a realizar el diseño riguroso de los intercambiadores en *Aspen Exchanger*. Este programa además de seguir las normativas antes mencionadas realiza el diseño más óptimo posible de los intercambiadores. En este apartado se explica el proceso seguido para el diseño del intercambiador E-302, el resto de los intercambiadores han seguido el mismo procedimiento y los resultados obtenidos se pueden apreciar en el **Capítulo 2**.

#### 11.5.4.1 Definición de los parámetros de las corrientes

El proceso de la planta ETHOXID ha sido simulado completamente con el programa *Aspen HYSYS V10*, por lo tanto, los intercambiadores han sido añadidos al proceso en dicho programa y los fluidos que circulan por carcasa y tubos han sido definidos al igual que sus temperaturas y presiones.

Para el diseño riguroso, primeramente, se especifican las propiedades de las corrientes que entran al intercambiador, para esto se puede importar la información de cada intercambiador desde el archivo del proceso diseñado en HYSYS, se selecciona el archivo y el intercambiador del cual se quieren importar los datos. Una vez hecho esto, las propiedades de los fluidos caliente y frío, como sus composiciones, temperaturas, presiones, densidad, viscosidad, entalpía, entre otras, estarán definidos también en Aspen Exchanger y se podrán observar en las pestañas que se aprecian en la **Figura 11.76**.

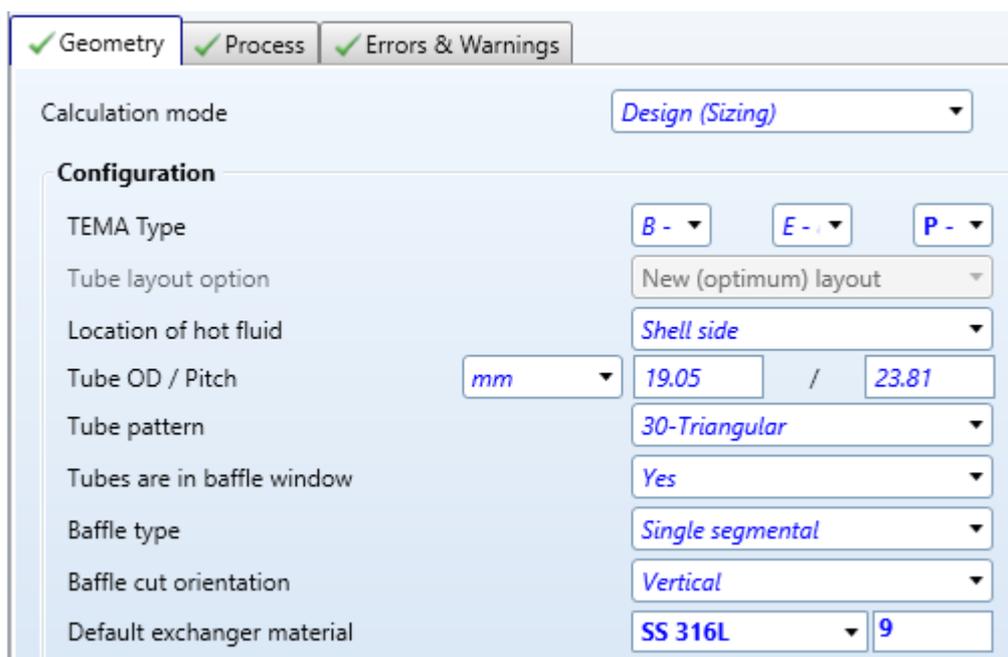


**Figura 11.76.** Pestañas del programa Aspen Exchanger donde se encontrarán las propiedades de los fluidos.

#### 11.5.4.2 Definición del intercambiador

Con las corrientes de fluido caliente y fluido frío determinadas, al igual que sus propiedades y composiciones. Se procede a ir a la pestaña *Console*, también observada en la **Figura 11.76**. En esta pestaña se define tanto la geometría del intercambiador como los caudales, los factores de ensuciamiento, y se comprueba que las temperaturas y presiones son correctas.

Primeramente, en la pestaña *Geometry* se selecciona el fluido que se quiere circular por carcasa y por tubos, en el caso del intercambiador E-302 se quiere calentar una corriente del proceso utilizando vapor como fluido térmico y por lo tanto se especifica que el fluido caliente (hot fluid) circule por carcasa. Posteriormente, se selecciona el pitch triangular (el pitch será el mismo en todos los intercambiadores), y se escoge como material del intercambiador el acero inoxidable 316L ya que este material soporta la corrosión, altas temperaturas y presiones. Se selecciona el tipo de TEMA BEP y el resto de los parámetros son rellenados automáticamente por el programa. En la **Figura 11.77** se pueden apreciar los resultados.



**Figure 11.77.** Parámetros definidos en la pestaña *Geometry*.

Se prosigue a comprobar en la pestaña *Process* que las presiones y temperaturas son las correctas y se definen los factores de ensuciamiento. Se define también el caudal másico del vapor que circulará por carcasa y se define la pérdida de presión máxima permitida, como se observa en la **Figura 11.78**.

	Hotside	ColdSide
Calculation mode	Design (Sizing)	
<b>Process Conditions</b>		
Mass flow rate	kg/h 5	120
Inlet pressure	kPa 1555	300
Outlet pressure	kPa 1550	292.378
Pressure at liquid surface in column	kPa	
Inlet Temperature	°C 200	38.86
Outlet Temperature	°C 199	110
Inlet vapor mass fraction	1	1
Outlet vapor mass fraction	0	1
Heat exchanged	kW	
<b>Process Input</b>		
Allowable pressure drop	kPa 25	50
Fouling resistance	m <sup>2</sup> -K/W 9E-05	0.00018

Figure 11.78. Parámetros definidos en la pestaña Process.

Se procede a correr el programa para que *Aspen Exchanger* itere hasta dar con el mejor diseño disponible para el intercambiador especificado. Si existe algún error en los parámetros definidos se procede a corregir los valores que indique el programa y en caso contrario se procede a comprobar que los resultados sean coherentes.

#### 11.5.4.3 Resultados

Una vez hecho el diseño riguroso, el programa presenta los resultados en la pestaña *Results* y se comprueba que los resultados obtenidos son los deseados. Los resultados que nos dará el programa serán la ejecución del intercambiador, sus condiciones de transferencia de calor, pérdida de presión, análisis de los caudales, análisis de inestabilidad donde se indica si a las condiciones de trabajo el intercambiador tiene problemas de vibración, resultados mecánicos como configuración del intercambiador, diseño de la placa de tubos, peso del intercambiador y coste aproximado.

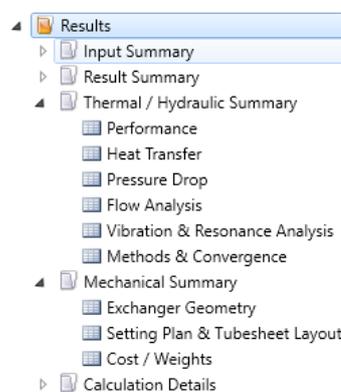


Figure 11.79 Pestaña donde se presentan todos los resultados obtenidos del diseño riguroso.

Aspen Exchanger proporciona un resumen de los resultados como el que se presenta en la **Figura 11.80**, al igual que una hoja TEMA (**Figura 11.81**). De estos dos se obtienen los valores necesarios para rellenar las fichas de cada intercambiador del **Capítulo 2**. Para el caso del intercambiador E-302 se obtienen los siguientes resultados.

1	Size	162.74	X	1219.2	mm	Type	BEP	Hor	Connected in	1 parallel	1 series
2	Surf/Unit (gross/eff/finned)	0.9	/	0.8	/	m <sup>2</sup> Shells/unit	1				
3	Surf/Shell (gross/eff/finned)	0.9	/	0.8	/	m <sup>2</sup>					
4	Design (Sizing)	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
5		Shell Side				Tube Side		Heat Transfer Parameters			
6	Process Data	In	Out	In	Out	Total heat load	kW		2.7		
7	Total flow	kg/h	5	120		Eff. MTD/ 1 pass MTD	°C		121.8 / 121.8		
8	Vapor	kg/h	5	0	120	120	Actual/Reqd area ratio - fouled/clean		2.72 / 2.78		
9	Liquid	kg/h	0	5	0	0	Coef./Resist.		W/(m <sup>2</sup> -K) m <sup>2</sup> -K/W %		
10	Noncondensable	kg/h	0	0	0	0	Overall fouled		72.1 0.01386		
11	Cond./Evap.	kg/h	5	0	0	0	Overall clean		73.8 0.01355		
12	Temperature	°C	200	199	38.86	110.02	Tube side film		75.2 0.0133 95.94		
13	Bubble Point	°C	200	200			Tube side fouling		4592.6 0.00022 1.57		
14	Dew Point	°C	200	200			Tube wall		8270.2 0.00012 0.87		
15	Vapor mass fraction		1	0	1	1	Outside fouling		11111.1 9E-05 0.65		
16	Pressure (abs)	kPa	1555	1554.997	300	297.003	Outside film		7428.5 0.00013 0.97		
17	DeltaP allow/cal	kPa	25	0.003	50	2.997					
18	Velocity	m/s	0.02	0	7.81	9.72					
19	Liquid Properties					Shell Side Pressure Drop		kPa %			
20	Density	kg/m <sup>3</sup>	854.96		Inlet nozzle		0.003 96.12				
21	Viscosity	cp	0.1345		InletspaceXflow		0 0.64				
22	Specific heat	kJ/(kg-K)	4.504		Baffle Xflow		0 2.33				
23	Therm. cond.	W/(m-K)	0.6653		Baffle window		0 0.23				
24	Surface tension	dynes/cm			Outlet space Xflow		0 0.08				
25	Molecular weight		18.02		Outlet nozzle		0 0.6				
26	Vapor Properties					Intermediate nozzles					
27	Density	kg/m <sup>3</sup>	7.58	3.64	2.93	Tube Side Pressure Drop		kPa %			
28	Viscosity	cp	0.0159	0.0162	0.0196	Inlet nozzle		1.374 46.67			
29	Specific heat	kJ/(kg-K)	2.105	1.1	1.162	Entering tubes		0.12 4.07			
30	Therm. cond.	W/(m-K)	0.0376	0.024	0.0294	Inside tubes		0.492 16.69			
31	Molecular weight		18.02	31.3	31.3	Exiting tubes		0.191 6.5			
32	Two-Phase Properties					Outlet nozzle		0.768 26.07			
33	Latent heat	kJ/kg	1930.6	1930.6	Intermediate nozzles						
34	Heat Transfer Parameters					Velocity / Rho*V2		m/s kg/(m-s <sup>2</sup> )			
35	Reynolds No. vapor	142.59		27607.88 22881.47		Shell nozzle inlet		0.93 7			
36	Reynolds No. liquid	16.83				Shell bundle Xflow		0.02 0			
37	Prandtl No. vapor	0.89		0.74 0.77		Shell baffle window		0.02 0			
38	Prandtl No. liquid	0.91				Shell nozzle outlet		0.01 0			
39	Heat Load	kW		kW		Shell nozzle intern					
40	Vapor only	0		2.7				m/s kg/(m-s <sup>2</sup> )			
41	2-Phase vapor	0		0		Tube nozzle inlet		26.53 2565			
42	Latent heat	-2.7		0		Tubes		7.81 9.72			
43	2-Phase liquid	0		0		Tube nozzle outlet		33.03 3193			
44	Liquid only	0		0		Tube nozzle intern					
45	Tubes					Baffles		Nozzles: (No./OD)			
46	Type	Plain		Type		Single segmental		Shell Side		Tube Side	
47	ID/OD	mm	15.75 / 19.05	Number		8		Inlet mm 1 / 21.34		1 / 26.67	
48	Length act/eff	m	1.2192 / 1.1557	Cut(%d)		37.33		Outlet 1 / 21.34		1 / 26.67	
49	Tube passes	2		Cut orientation		V		Intermediate / /			
50	Tube No.	12		Spacing: c/c		mm 120.65		Impingement protection		None	
51	Tube pattern	30		Spacing at inlet		mm 155.57					
52	Tube pitch	mm	23.81	Spacing at outlet		mm 155.57					
53	Insert	None									
54	Vibration problem (HTFS / TEMA)	No /				RhoV2 violation				No	

Figura 11.80. Resultados generales obtenidos del diseño riguroso del intercambiador E-302 con Aspen Exchanger.

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:		Job No.:					
6	Size:	152 - 1219.2	mm	Type:	BEP Horizontal	Connected in:		1 parallel	1 series	
7	Surf/unit(eff.)	0.8	m <sup>2</sup>	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)		0.8	m <sup>2</sup>	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side			
10	Fluid name			H.W.2->H.W.2'			14->27			
11	Fluid quantity, Total			kg/h			5			
12	Vapor (In/Out)			kg/h			5		0	
13	Liquid			kg/h			0		5	
14	Noncondensable			kg/h			0		0	
15										
16	Temperature (In/Out)			°C			200		199	
17	Bubble / Dew point			°C			200 / 200		200 / 200	
18	Density Vapor/Liquid			kg/m <sup>3</sup>			7.58 /		/ 854.96	
19	Viscosity			cp			0.0159 /		/ 0.1345	
20	Molecular wt, Vap						18.02		31.3	
21	Molecular wt, NC								31.3	
22	Specific heat			kJ/(kg-K)			2.105 /		/ 4.504	
23	Thermal conductivity			W/(m-K)			0.0376 /		/ 0.6653	
24	Latent heat			kJ/kg			1930.6		1930.6	
25	Pressure (abs)			kPa			1555		1554.997	
26	Velocity (Mean/Max)			m/s			0.01 / 0.02		8.66 / 9.72	
27	Pressure drop, allow./calc.			kPa			25		0.003	
28	Fouling resistance (min)			m <sup>2</sup> -K/W			9E-05		0.00018 0.00022 Ao based	
29	Heat exchanged			kW			2.7		MTD (corrected) 121.8 °C	
30	Transfer rate, Service			Dirty			26.5		Clean 72.1 73.8 W/(m <sup>2</sup> -K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32				Shell Side			Tube Side			
33	Design/Vacuum/test pressure			kPa			1723.69 /		/ 344.738 /	
34	Design temperature			°C			237.78		148.89	
35	Number passes per shell						1		2	
36	Corrosion allowance			mm			0		0	
37	Connections		In		mm		1 12.7 /		- 1 19.05 /	
38	Size/Rating		Out		mm		1 12.7 /		- 1 19.05 /	
39	Nominal		Intermediate		mm		/ -		/ -	
40	Tube #:	12	OD:	19.05	Tks. Average	1.65	mm	Length:	1219.2	mm
41	Tube type:	Plain	Insert:	None	Fin#:			#/m		Material:SS 316L
42	Shell	SS 316L	ID	162.74	OD	168.28	mm	Shell cover	-	
43	Channel or bonnet	SS 316L				Channel cover	SS 316L			
44	Tubesheet-stationary	SS 316L				Tubesheet-floating	-			
45	Floating head cover	-				Impingement protection	None			
46	Baffle-cross	SS 316L	Type	Single segmental	Cut(%d)	37.33	VertiSpacing:	c/c	120.65	mm
47	Baffle-long	-	Seal Type				Inlet	155.57 mm		
48	Supports-tube	U-bend	Type	0		Type				
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint	Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')				
50	Expansion joint	-	Type	None						
51	RhoV2-Inlet nozzle	7	Bundle entrance	0		Bundle exit	0		kg/(m-s <sup>2</sup> )	
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal Jacket Fibe			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	124.5	Filled with water	149.6		Bundle	29.8		kg	
56	Remarks									
57										
58										

Figure 11.81 Resultados TEMA obtenidos del diseño riguroso del intercambiador E-302 con Aspen Exchanger.

## 11.6 Diseño del almacenamiento del óxido de etileno

### 11.6.1 Dimensionamiento

Dada la alta demanda de óxido de etileno en el mercado, se ha diseñado la zona de almacenamiento para albergar la producción de un máximo de tres días, en seis depósitos distintos y en estado líquido, con nitrógeno como gas inerte. El volumen de cada uno se calcula mediante la **ecuación 11.224**:

$$\text{Ecuación 11.224 } V = \frac{P \cdot Da}{Do \cdot N} * 1,2 = \frac{133481 \cdot 3}{320 \cdot 6} * 1,2 = 250,28 \text{ m}^3$$

$$P = \text{Producción anual } \left(\frac{\text{m}^3}{a}\right)$$

$$Da = \text{Días de almacenamiento}$$

$$Do = \text{Días de operación anuales}$$

$$N = \text{Número de tanques}$$

Estos tanques serán cilíndricos y verticales, con cabezales toriesféricos. El cilindro seguirá una proporción Altura/Diámetro de 1,5, mientras que la altura de cada cabezal será de 0,2 veces el diámetro del cilindro. Teniendo estas condiciones, podemos saber el diámetro a partir de la **ecuación 11.225**:

$$\text{Ecuación 11.225 } D = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \left(\frac{H/D + 1}{4} + \frac{1}{12}\right)}} = \sqrt[3]{\frac{250,28}{\pi \left(\frac{1,9 + 1}{4} + \frac{1}{12}\right)}} = 5,22 \text{ m}$$

$$V = \text{Volumen del reactor } (\text{m}^3)$$

$$\frac{H}{D} = \text{Proporción Altura/Diámetro}$$

Multiplicando el diámetro por 1,9, se obtiene la altura del tanque, que resulta de 9,93 metros.

Los tanques estarán pensados para operar a 5 atm (506625 Pa), siguiendo la normativa ITC MIE APQ-2. Aun así, el tanque debe de ser diseñado para resistir también la presión hidrostática del fluido una vez el tanque esté lleno. El cálculo de la presión de diseño se muestra en la **ecuación 11.226**:

$$\text{Ecuación 11.226 } Pd = (Po + (\rho * h * g)) * 1,2 = (506625 + (899 * 9,93 * 9,81)) * 1,2 = 713022,73 \text{ Pa} \approx 7,04 \text{ atm}$$

$P_o =$  Presión de operación (Pa)

$\rho =$  Densidad del óxido de etileno ( $kg/m^3$ )

$h =$  Altura del tanque de almacenamiento (m)

Para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico y de los cabezales se utilizan las **ecuaciones 11.9 y 11.11**, respectivamente. Al estar construidos con acero inoxidable 304, y operar en un rango de temperaturas de entre 0 y 40 °C, el valor de S extraído de la **tabla 11.7** es de 18,8 ksi, o 1279,26 atm:

$$t_{cilindro} = \frac{7,04 * 5220/2}{1279,26 * 0,85 - 0,6 * 7,04} + 1,5 = 18,48 \text{ mm}$$

$$t_{cabezal} = \frac{0,885 * 7,04 * 5220}{1279,26 * 0,85 - 0,6 * 7,04} + 1,5 = 30,03 \text{ mm}$$

Los diámetros externos se calculan mediante las **ecuaciones 11.10 y 11.12**:

$$decil = 5,22 + 2 * 0,01848 = 5,26 \text{ m}$$

$$decabezal = 5,22 + 2 * 0,03003 = 5,28 \text{ m}$$

Finalmente, se calcula la masa del tanque, tanto lleno como vacío. La masa del cuerpo cilíndrico se puede calcular mediante la **ecuación 11.227**:

$$\text{Ecuación 11.227 } m_{cil} = \frac{\pi}{4} * (De^2 - Di^2) * hcil * \rho = \frac{\pi}{4} * (5,26^2 - 5,22^2) * 1,5 * 5,22 * 7982 = 20577 \text{ kg}$$

$De =$  Diámetro externo (m)

$Di =$  Diámetro interno (m)

$hcil =$  Altura el cuerpo cilíndrico (m)

$\rho =$  Densidad del acero inoxidable 304 ( $kg/m^3$ )

La masa de cada uno de los cabezales se calcula a partir de la **ecuación 11.228**:

$$\text{Ecuación 11.228 } m_{cab} = 0,1 * (De^3 - Di^3) * \rho = 0,1 * (5,28^3 - 5,22^3) * 7982 = 3960 \text{ kg}$$

$De =$  Diámetro externo (m)

$Di =$  Diámetro interno (m)

$\rho =$  Densidad del acero inoxidable 304 ( $kg/m^3$ )

La masa del tanque vacío se puede calcular mediante la **ecuación 11.229**:

$$\text{Ecuación 11.229 } m_{\text{vacío}} = m_{\text{cil}} + 2 * m_{\text{cab}} = 20577 + 2 * 3960 = 28497 \text{ kg}$$

Por último, con la **ecuación 11.230** se calcula el peso del tanque una vez esté lleno de producto, y con la **ecuación 11.231** se calcula el área de este:

$$\text{Ecuación 11.230 } m_{\text{total}} = m_{\text{vacío}} + V * \rho = 28497 + 250,28 * 899 = 253247 \text{ kg}$$

$V = \text{Volumen del tanque (m}^3\text{)}$

$\rho = \text{Densidad del óxido de etileno (kg/m}^3\text{)}$

$$\text{Ecuación 11.231 } A = \pi * D * h_{\text{cil}} + 2 * 1,2 * D * \frac{\pi}{4} = \pi * 5,22 * 1,5 * 5,22 + 2 * 1,2 * 1,5 * \frac{\pi}{4} = 131,23 \text{ m}^2$$

$D = \text{Diámetro del tanque (m)}$

$h_{\text{cil}} = \text{Altura del cuerpo cilíndrico (m)}$

### 11.6.2 Aislamiento y refrigeración

Siguiendo la normativa ITC MIE APQ-2, los tanques deben almacenarse a una temperatura de entre 4 y 15°C, y es importante que no superen los 40°C, por riesgo a que se produzca una polimerización. Como las temperaturas ambientales pueden llegar a más de 40°C, es imprescindible aislar los tanques, al igual que tener un aislamiento térmico. Como aislante se usa una capa de 12 cm de grosor de lana de roca ( $k=0,042 \text{ W/ (m} \cdot \text{K)}$ ).

A continuación, con la **ecuación 11.232** se calcula el flujo de temperatura al cual podría estar expuesto el tanque en un día de temperaturas máximas (45°C), suponiendo que la única resistencia térmica viene dada por la lana de roca.

$$\text{Ecuación 11.232 } q = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta X}{A * k}} = \frac{45-15}{\frac{0,12}{131,23 * 0,042}} = 2066,87 \text{ W}$$

$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del tanque (}^{\circ}\text{C)}$

$\Delta X = \text{Grosor del aislante (m)}$

$A = \text{Área del tanque (m}^2\text{)}$

$k = \text{Conductividad térmica del aislante (}$  $\frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$  $)$

Este flujo ha de ser retirado por el caudal de agua que circula por un serpentín por el interior del tanque. Esta entra a 5 grados, y se diseña el equipo para que no salga a más de 10°C. Con la **ecuación 11.233** se puede calcular el caudal de agua de refrigeración necesario.

$$\text{Ecuación 11.233 } m = \frac{q}{Cp \cdot \Delta TH2O} = \frac{2066,87}{4181 \cdot (10-5)} = 0,099 \frac{kg}{s}$$

Dónde:

$Cp =$  Calor específico del agua ( $\frac{J}{Kg \cdot K}$ )

$\Delta TH2O =$  Diferencia de temperatura del agua ( $^{\circ}C$ )

Como el caudal de agua es muy reducido, se decide instalar una espira genérica dentro del tanque, por la cual solo circulará el refrigerante si el sistema de control detecta un problema de temperatura.

### 11.6.3 Cubetos

Como los tanques de almacenamiento deben estar a un mínimo de un metro de distancia, según la normativa ITC MIE APQ-2, estos mantendrán una distancia de 1,5 metros entre cada uno, en dos hileras de tres tanques (**Figura 11.82**). Al estar cerca, se decide instalar un solo cubeto para todos ellos. Siguiendo la normativa ITC MIE APQ-1, los cubetos deben tener suficiente volumen como para contener el 100% del líquido almacenado del tanque más grande, en este caso, 250,28 m<sup>3</sup>, deben tener un mínimo de 1 metro de altura, y estar contruidos de hormigón. El cubeto tendrá una forma rectangular, y sus dimensiones se calculan con las **ecuaciones 11.234, 11.235 y 11.236**:

$$\text{Ecuación 11.234 } La = 3 * 1,5 + 2 * De = 3 * 1,5 + 2 * 5,26 = 15,02 \text{ m}$$

$$\text{Ecuación 11.235 } Lb = 4 * 1,5 + 3 * De = 4 * 1,5 + 3 * 5,26 = 21,78 \text{ m}$$

$$\text{Ecuación 11.236 } Vc = La * Lb * Hc = 15,02 * 21,78 * 1 = 327,14 \text{ m}^3$$

Dónde:

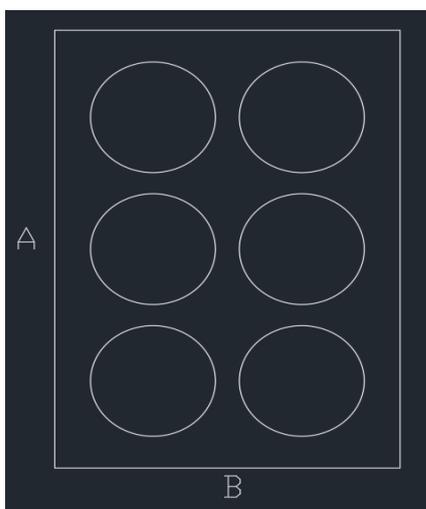
$La$  = Longitud del lado A del cubeto (m)

$Lb$  = Longitud del lado B del cubeto (m)

$De$  = Diámetro externo del tanque (m)

$Vc$  = Volumen del cubeto (m<sup>3</sup>)

$Hc$  = Altura del cubeto (m)



**Figura 11.82.** Disposición de los tanques en la planta.

## 11.7 Diseño del tanque pulmón de etileno

El etileno usado como reactivo pasa por un tanque pulmón antes de entrar a la zona de reacción, para poder mantener un control de sus condiciones.

El volumen de dicho tanque pulmón se puede calcular con la **ecuación 11.237**. Se supone un tiempo de residencia de 2 minutos.

$$\text{Ecuación 11.237 } V = Q * \tau * 1,2 = 535,4 * \frac{2}{60} * 1,2 = 21,42 \text{ m}^3$$

$$Q = \text{Caudal volumétrico } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$$

$$\tau = \text{Tiempo de residencia (h)}$$

Estos tanques serán cilíndricos y verticales, con cabezales toriesféricos. El cilindro seguirá una proporción Altura/Diámetro de 1,5, mientras que la altura de cada cabezal será de 0,2 veces el diámetro del cilindro. Teniendo estas condiciones, podemos saber el diámetro a partir de la **ecuación 11.238**:

$$\text{Ecuación 11.238 } D = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi\left(\frac{H/D+1}{4}\right)}} = \sqrt[3]{\frac{21,42}{\pi\left(\frac{1,9+1}{4}\right)}} = 2,30 \text{ m}$$

$$V = \text{Volumen del reactor (m}^3\text{)}$$

$$\frac{H}{D} = \text{Proporcion Altura/Diametro}$$

Multiplicando el diámetro por 1,9, se obtiene la altura del tanque, que resulta de 4,37 metros.

El tanque pulmón está pensado para operar a 16 bar (1600 KPa). Aun así, el tanque debe de ser diseñado para resistir también la presión hidrostática del fluido una vez el tanque esté lleno. El cálculo de la presión de diseño se muestra en la **ecuación 11.239**.

$$\text{Ecuación 11.239 } Pd = (Po + (\rho * h * g)) * 1,2 = (1600000 + (21,75 * 4,37 * 9,81)) * 1,2 = 1921119 \text{ Pa} \approx 18,96 \text{ atm}$$

$$Po = \text{Presión de operación (Pa)}$$

$$\rho = \text{Densidad del etileno (kg/m}^3\text{)}$$

$$h = \text{Altura del tanque de almacenamiento (m)}$$

Para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico y de los cabezales se utilizan las **ecuaciones 11.9 y 11.11**, respectivamente. Al estar construidos con acero inoxidable 304, y operar en un rango de temperaturas de entre 0 y 40°C, el valor de S extraído de la **tabla 11.7** es de 18,8ksi, o 1279,26 atm.

$$\text{Ecuación 11.9 } t_{\text{cilindro}} = \frac{18,96 \cdot 2300 / 2}{1279,26 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 18,96} + 1,5 = 21,76 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.11 } t_{\text{cabezal}} = \frac{0,885 \cdot 18,96 \cdot 2300}{1279,26 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 18,96} + 1,5 = 37,37 \text{ mm}$$

Los diámetros externos se calculan mediante las **ecuaciones 11.10 y 11.12**:

$$\text{Ecuación 11.10 } d_{\text{cil}} = 2,3 + 2 \cdot 0,02176 = 2,34 \text{ m}$$

$$\text{Ecuación 11.12 } d_{\text{cabezal}} = 2,3 + 2 \cdot 0,03737 = 2,37 \text{ m}$$

Finalmente, se calcula la masa del tanque, tanto lleno como vacío. La masa del cuerpo cilíndrico se puede calcular mediante la **ecuación 11.240**:

$$\text{Ecuación 11.240 } m_{\text{cil}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot h_{\text{cil}} \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot (2,34^2 - 2,30^2) \cdot 1,5 \cdot 4,37 \cdot 7982 = 7627 \text{ kg}$$

$D_e$  = Diámetro externo (m)

$D_i$  = Diámetro interno (m)

$h_{\text{cil}}$  = Altura el cuerpo cilíndrico (m)

$\rho$  = Densidad del acero inoxidable 304 ( $\text{kg/m}^3$ )

La masa de cada uno de los cabezales se calcula a partir de la **ecuación 11.241**:

$$\text{Ecuación 11.241 } m_{\text{cab}} = 0,1 \cdot (D_e^3 - D_i^3) \cdot \rho = 0,1 \cdot (2,37^3 - 2,30^3) \cdot 7982 = 914 \text{ kg}$$

$D_e$  = Diámetro externo (m)

$D_i$  = Diámetro interno (m)

$\rho$  = Densidad del acero inoxidable 304 ( $\text{kg/m}^3$ )

La masa del tanque vacío se puede calcular mediante la **ecuación 11.242**:

$$\text{Ecuación 11.242 } m_{\text{vacío}} = m_{\text{cil}} + 2 \cdot m_{\text{cab}} = 7627 + 2 \cdot 914 = 9455 \text{ kg}$$

Por último, con la **ecuación 11.243** se calcula el peso del tanque una vez esté lleno de etileno.

$$\text{Ecuación 11.243 } m_{\text{total}} = m_{\text{vacío}} + V * \rho = 9455 + 21,42 * 21,75 = 9921 \text{ kg}$$

$V = \text{Volumen del tanque (m}^3\text{)}$

$\rho = \text{Densidad del etileno (kg/m}^3\text{)}$

## 11.8 Diseño del tanque pulmón de oxígeno

El oxígeno usado como reactivo pasa por un tanque pulmón antes de entrar a la zona de reacción, para poder mantener un control de sus condiciones.

El volumen de dicho tanque pulmón se puede calcular con la **ecuación 11.244**. Se supone un tiempo de residencia de 2 minutos:

$$\text{Ecuación 11.244 } V = Q * \tau * 1,2 = 502,7 * \frac{2}{60} * 1,2 = 20,11 \text{ m}^3$$

$Q = \text{Caudal volumétrico } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$

$\tau = \text{Tiempo de residencia (h)}$

Estos tanques serán cilíndricos y verticales, con cabezales toriesféricos. El cilindro seguirá una proporción Altura/Diámetro de 1,5, mientras que la altura de cada cabezal será de 0,2 veces el diámetro del cilindro. Teniendo estas condiciones, podemos saber el diámetro a partir de la **ecuación 11.245**:

$$\text{Ecuación 11.245 } D = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi\left(\frac{H/D+1}{4}+\frac{1}{12}\right)}} = \sqrt[3]{\frac{21,42}{\pi\left(\frac{1,9+1}{4}+\frac{1}{12}\right)}} = 2,25 \text{ m}$$

$V = \text{Volumen del reactor (m}^3\text{)}$

$\frac{H}{D} = \text{Proporcion Altura/Diametro}$

Multiplicando el diámetro por 1,9, se obtiene la altura del tanque, que resulta de 4,28 metros.

El tanque pulmón está pensado para operar a 16 bar (1600 KPa). Aun así, el tanque debe de ser diseñado para resistir también la presión hidrostática del fluido una vez el tanque esté lleno. El cálculo de la presión de diseño se muestra en la **ecuación 11.246**:

$$\text{Ecuación 11.246 } Pd = (Po + (\rho * h * g)) * 1,2 = (1600000 + (22,28 * 4,28 * 9,81)) * 1,2 = 1921122 \text{ Pa} \approx 18,96 \text{ atm}$$

$Po =$  Presión de operación (Pa)

$\rho =$  Densidad del oxígeno ( $kg/m^3$ )

$h =$  Altura del tanque de almacenamiento (m)

Para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico y de los cabezales se utilizan las **ecuaciones 11.9 y 11.11**, respectivamente. Al estar construidos con acero inoxidable 304, y operar en un rango de temperaturas de entre 0 y 40°C, el valor de S extraído de la **tabla 11.7** es de 18,8ksi, o 1279,26 atm.

$$\text{Ecuación 11.9 } tcilindro = \frac{18,96 * 2250 / 2}{1279,26 * 0,85 - 0,6 * 18,96} + 1,5 = 21,32 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.11 } tcabezal = \frac{0,885 * 18,96 * 2250}{1279,26 * 0,85 - 0,6 * 18,96} + 1,5 = 36,59 \text{ mm}$$

Los diámetros externos se calculan mediante las **ecuaciones 11.10 y 11.12**:

$$\text{Ecuación 11.10 } decil = 2,25 + 2 * 0,02132 = 2,29 \text{ m}$$

$$\text{Ecuación 11.12 } decabezal = 2,25 + 2 * 0,03659 = 2,32 \text{ m}$$

Finalmente, se calcula la masa del tanque, tanto lleno como vacío. La masa del cuerpo cilíndrico se puede calcular mediante la **ecuación 11.247**:

$$\text{Ecuación 11.247 } mcil = \frac{\pi}{4} * (De^2 - Di^2) * hcil * \rho = \frac{\pi}{4} * (2,29^2 - 2,25^2) * 1,5 * 4,28 * 7982 = 7309 \text{ kg}$$

$De =$  Diámetro externo (m)

$Di =$  Diámetro interno (m)

$hcil =$  Altura el cuerpo cilíndrico (m)

$\rho =$  Densidad del acero inoxidable 304 ( $kg/m^3$ )

La masa de cada uno de los cabezales se calcula a partir de la **ecuación 11.248**:

$$\text{Ecuación 11.248 } m_{cab} = 0,1 * (De^3 - Di^3) * \rho = 0,1 * (2,32^3 - 2,25^3) * 7982 = 875 \text{ kg}$$

$De$  = Diámetro externo (m)

$Di$  = Diámetro interno (m)

$\rho$  = Densidad del acero inoxidable 304 ( $kg/m^3$ )

La masa del tanque vacío se puede calcular mediante la **ecuación 11.249**:

$$\text{Ecuación 11.249 } m_{vacío} = m_{cil} + 2 * m_{cab} = 7309 + 2 * 875 = 9059 \text{ kg}$$

Por último, con la **ecuación 11.250** se calcula el peso del tanque una vez esté lleno de oxígeno.

$$\text{Ecuación 11.250 } m_{total} = m_{vacío} + V * \rho = 9059 + 20,11 * 22,28 = 9507 \text{ kg}$$

$V$  = Volumen del tanque ( $m^3$ )

$\rho$  = Densidad del oxígeno ( $kg/m^3$ )

## 11.9 Diseño del tanque de almacenamiento de monoetanolamina

La monoetanolamina empleada se almacena en un tanque antes de empezar el proceso.

El volumen de dicho tanque pulmón se puede calcular con la **ecuación 11.251**. Se supone un tiempo de residencia de la monoetanolamina en el proceso de 10 minutos.

$$\text{Ecuación 11.251 } V = Q * \tau * 1,2 = 102,8 * \frac{10}{60} * 1,2 = 20,56 \text{ m}^3$$

$$Q = \text{Caudal volumétrico } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$$

$$\tau = \text{Tiempo de residencia (h)}$$

Estos tanques serán cilíndricos y verticales, con cabezales toriesféricos. El cilindro seguirá una proporción Altura/Diámetro de 1,5, mientras que la altura de cada cabezal será de 0,2 veces el diámetro del cilindro. Teniendo estas condiciones, podemos saber el diámetro a partir de la **ecuación 11.252**:

$$\text{Ecuación 11.252 } D = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \left(\frac{H/D + 1}{4} + \frac{1}{12}\right)}} = \sqrt[3]{\frac{20,56}{\pi \left(\frac{1,9 + 1}{4} + \frac{1}{12}\right)}} = 2,27 \text{ m}$$

$$V = \text{Volumen del reactor (m}^3\text{)}$$

$$\frac{H}{D} = \text{Proporcion Altura/Diametro}$$

Multiplicando el diámetro por 1,9, se obtiene la altura del tanque, que resulta de 4,31 metros.

El tanque está pensado para operar a presión atmosférica (101325Pa). Aun así, el tanque debe de ser diseñado para resistir también la presión hidrostática del fluido una vez el tanque esté lleno. El cálculo de la presión de diseño se muestra en la **ecuación 11.253**:

$$\text{Ecuación 11.253 } Pd = (Po + (\rho * h * g)) * 1,2 = (101325 + (1001 * 4,31 * 9,81)) * 1,2 = 172378 \text{ Pa} \approx 1,70 \text{ atm}$$

$$Po = \text{Presión de operación (Pa)}$$

$$\rho = \text{Densidad de la metilamina (kg/m}^3\text{)}$$

$$h = \text{Altura del tanque de almacenamiento (m)}$$

Para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico y de los cabezales se utilizan las **ecuaciones 11.9 y 11.11**, respectivamente. Al estar construidos con acero inoxidable 304, y operar en un rango de temperaturas de entre 0 y 40°C, el valor de S extraído de la **tabla 11.7** es de 18,8ksi, o 1279,26 atm.

$$\text{Ecuación 11.9 } t_{\text{cilindro}} = \frac{1,70 \cdot 2270 / 2}{1279,26 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,70} + 1,5 = 3,28 \text{ mm}$$

$$\text{Ecuación 11.11 } t_{\text{cabezal}} = \frac{0,885 \cdot 1,70 \cdot 2270}{1279,26 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,70} + 1,5 = 4,64 \text{ mm}$$

Los diámetros externos se calculan mediante las **ecuaciones 11.10 y 11.12**:

$$\text{Ecuación 11.10 } d_{\text{cil}} = 2,27 + 2 \cdot 0,00328 = 2,28 \text{ m}$$

$$\text{Ecuación 11.12 } d_{\text{cabezal}} = 2,27 + 2 \cdot 0,00464 = 2,28 \text{ m}$$

Finalmente, se calcula la masa del tanque, tanto lleno como vacío. La masa del cuerpo cilíndrico se puede calcular mediante la **ecuación 11.254**:

$$\text{Ecuación 11.254 } m_{\text{cil}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot h_{\text{cil}} \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot (2,28^2 - 2,27^2) \cdot 1,5 \cdot 4,31 \cdot 7982 = 1844 \text{ kg}$$

$D_e$  = Diámetro externo (m)

$D_i$  = Diámetro interno (m)

$h_{\text{cil}}$  = Altura el cuerpo cilíndrico (m)

$\rho$  = Densidad del acero inoxidable 304 ( $\text{kg/m}^3$ )

La masa de cada uno de los cabezales se calcula a partir de la **ecuación 11.255**:

$$\text{Ecuación 11.255 } m_{\text{cab}} = 0,1 \cdot (D_e^3 - D_i^3) \cdot \rho = 0,1 \cdot (2,28^3 - 2,27^3) \cdot 7982 = 124 \text{ kg}$$

$D_e$  = Diámetro externo (m)

$D_i$  = Diámetro interno (m)

$\rho$  = Densidad del acero inoxidable 304 ( $\text{kg/m}^3$ )

La masa del tanque vacío se puede calcular mediante la **ecuación 11.256**:

$$\text{Ecuación 11.256 } m_{\text{vacío}} = m_{\text{cil}} + 2 \cdot m_{\text{cab}} = 1844 + 2 \cdot 124 = 2092 \text{ kg}$$

---

Por último, con la **ecuación 11.257** se calcula el peso del tanque una vez esté lleno de monoetanolamina.

$$\text{Ecuación 11.257 } m_{\text{total}} = m_{\text{vacío}} + V * \rho = 2092 + 20,56 * 1001 = 22673 \text{ kg}$$

$V = \text{Volumen del tanque (m}^3\text{)}$

$\rho = \text{Densidad de la metilamina (kg/m}^3\text{)}$

## 11.10 Servicios de planta

### 11.10.1 Caldera de vapor

#### 11.10.1.1 Diseño de la caldera de vapor de agua

En la planta ETHOXID se usa vapor de agua a 200°C como fluido de servicio para 4 de los intercambiadores de calor. Cabe especificar que el consumo de agua es mediante circuito cerrado por lo que el vapor se condensará para volver a usar el agua en las calderas. Este vapor, se deberá generar a partir de una caldera de vapor por lo que la siguiente tabla indica los requerimientos en específico de vapor:

**Tabla 11.21.** Caudales de vapor de agua a 200°C para los intercambiadores E-302, E-501, E-503 y E-504.

Equipo	Temperatura Entrada (°C)	Temperatura Salida (°C)	Caudal (kg/h)
E-302	200	199	5
E-501	200	199	8.000
E-503	200	199	230
E-504	200	199	3.200
<b>Caudal total de vapor (kg/h)</b>			<b>11.435</b>

Una vez se ha determinado la cantidad total de vapor de agua necesario, cabe especificar que los caudales de vapor de entrada a los intercambiadores de calor cambiarán de fase a agua líquida que será recirculada a las calderas para producir el vapor.

A continuación, se procede al cálculo de los parámetros necesarios para su diseño: la potencia:

- Potencia de la caldera de vapor de agua:

Para la determinación de la potencia útil de la caldera de vapor será necesario conocer el caudal total necesario de vapor de agua y las entalpías de entrada y salida del vapor a 200°C y 15 bares de presión que será recirculado:

$$\text{Ecuación 11.258 } Q_{cu} = m_v \cdot (h_v - h_w) = 11435 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \left( 2792,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 844,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 4185 \text{ kW}$$

Dónde:

$Q_c$  = potencia de la caldera (kW)

$m_v$  = caudal másico de vapor de agua necesario (kg/h)

$h_v$  = entalpía del vapor caliente de salida (kJ/kg)

$h_w$  = entalpía del líquido frío de entrada (kJ/kg)

La caldera de vapor será diseñada para producir 11435 kg/h de vapor de agua, en este caso, a 15 bares de presión por lo que su potencia útil será de 4185 kW.

No obstante, se ha considerado que la caldera de vapor de agua dispone únicamente de un 80% de rendimiento, por lo que la potencia real pasará a ser:

$$\text{Ecuación 11.259 } Q_c = \frac{Q_{cu}}{\eta} = \frac{4185 \text{ kW}}{0,80} = 5231 \text{ kW}$$

Dónde:

$Q_c$  = potencia real de la caldera de vapor (kW)

$Q_{cu}$  = potencia útil de la caldera de vapor (kW)

$\eta$  = rendimiento de la caldera

#### 11.10.1.2 Diseño de la caldera de vapor de Dowtherm A

En la planta ETHOXID se usa vapor de Dowtherm A a 377°C como fluido de servicio para 1 intercambiador de calor. Este vapor, se deberá generar a partir de una caldera de vapor por lo que la siguiente tabla indica los requerimientos en específico de vapor:

**Tabla 11.22.** Caudal de vapor de Dowtherm A para el intercambiador de calor E-200.

Equipo	Temperatura Entrada (°C)	Temperatura Salida (°C)	Caudal (kg/h)
E-200	377	128	109.000
Caudal total de vapor (kg/h)			109.000

Una vez se ha determinado la cantidad total de vapor de Dowtherm A necesario, cabe especificar que el caudal de vapor de entrada al intercambiador de calor cambiará de fase a agua líquida que será recirculada a la caldera para producir el vapor.

A continuación, se procede al cálculo de los parámetros necesarios para su diseño, la potencia:

- Potencia de la caldera de vapor de Dowtherm A:

Para la determinación de la potencia útil de la caldera de vapor será necesario conocer el caudal total necesario de vapor de Dowtherm A y las entalpías de entrada y salida del vapor a 377°C:

$$\text{Ecuación 11.260 } Q_{cu} = m_v \cdot (h_v - h_w) = 109000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600 \text{ s}} \left( 934 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 694 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 6266 \text{ kW}$$

Dónde:

$Q_c = \text{potencia de la caldera (kW)}$

$m_v = \text{caudal másico de vapor de Dowtherm A necesario (kg/h)}$

$h_v = \text{entalpía del vapor caliente de salida (kJ/kg)}$

$h_w = \text{entalpía del líquido frío de entrada (kJ/kg)}$

La caldera de vapor será diseñada para producir 109.000 kg/h de vapor de Dowtherm A, en este caso, dispondrá de una potencia útil será de 6266 kW.

No obstante, se ha considerado que la caldera de vapor de agua dispone únicamente de un 80% de rendimiento, por lo que la potencia real pasará a ser:

$$\text{Ecuación 11.261 } Q_c = \frac{Q_{cu}}{\eta} = \frac{6266 \text{ kW}}{0,80} = 7832 \text{ kW}$$

Dónde:

$Q_c = \text{potencia real de la caldera de vapor (kW)}$

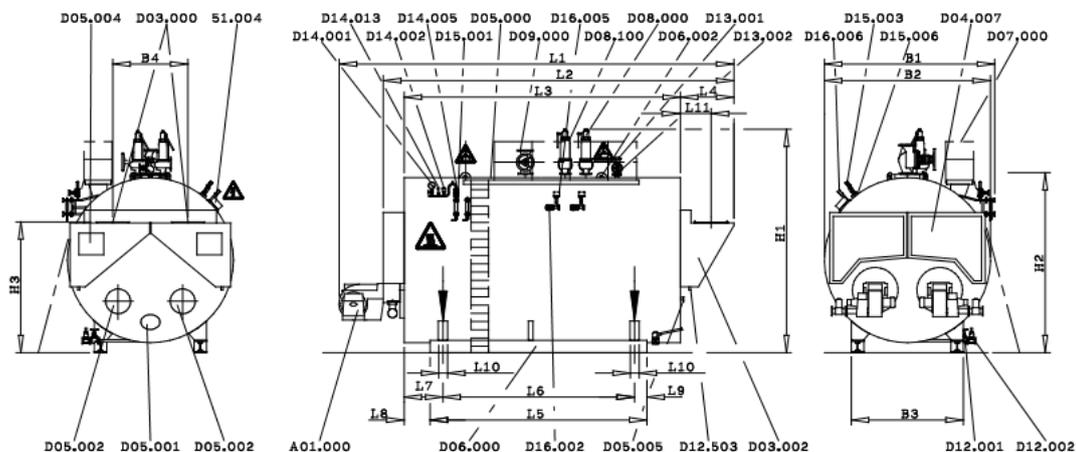
$Q_{cu} = \text{potencia útil de la caldera de vapor (kW)}$

$\eta = \text{rendimiento de la caldera}$

#### 11.10.1.3 Elección de las calderas de vapor

Una vez se han calculado tanto la potencia como la cantidad de combustible necesario, se ha decidido optar por calderas UNIVERSAL ZFR, ZFR-X de la marca Bosch. Estas calderas son calderas de gran volumen de agua con tecnología de tres pasos, dos hogares y circuitos de gases independientes. Así mismo, disponen de un alto rango de producción de vapor, entre 18000 y 55000 kg/h hasta 30 bares de presión, en nuestro caso, 15 bares.

A continuación, gracias a los planos aportados por la empresa Bosch, [4], se puede observar la estructura de las calderas en las siguientes figuras:



51.004	Terminal box	D12.002	Quick shut-off blow-down valve
A01.000	Burner	D12.503	Connection for drainage flue gas condensate
D03.000	Flue gas connection socket	D13.001	Feet water shut-off valve
D03.002	Flue gas chamber	D13.002	Feet water non-return valve
D04.007	Reversing chamber door	D14.001	Pressure indicator (test unit)
D05.001	Inspection opening water side	D14.002	Pressure limiter
D05.002	Inspection opening flue gas side	D14.005	Shut-off valve
D05.004	Cleaning opening flue gas side	D14.013	Pressure transducer
D05.005	Sight hole	D15.001	Level indicator 1
D06.000	Base frame		Level indicator 2 <b>Option</b>
D06.002	Transportation lug	D15.003	Level transducer
D07.000	Operating platform <b>Option</b>	D15.006	Level limiter
D08.000	Pressure safeguard valve 1	D16.002	Desalting shut-off valve <b>Option</b> <sup>4)</sup>
D08.100	Pressure safeguard valve 2 <b>Option</b>	D16.005	Desalting control valve <b>Option</b> <sup>4)</sup>
D09.000	Steam shut-off valve	D16.006	Conductivity transmitter <b>Option</b>
D12.001	Drain shut-off valve		

**Figura 11.83.** Ficha técnica de la caldera de vapor UNIVERSAL ZFR de la marca Bosch.

## Main dimensions



### UNIVERSAL High-pressure steam boiler ZFR

in three-pass double-flue flame-tube smoke tube technology

DA023

Version 1 (07/12)

UNIVERSAL High pressure steam boiler Type	Dimensions								Flue gas connection		
	L 1 <sup>2)</sup> [mm]	L 2 <sup>1) 3)</sup> [mm]	L 3 [mm]	L 4 [mm]	B 1 [mm]	B 2 <sup>1)</sup> [mm]	H 1 <sup>3)</sup> [mm]	H 2 <sup>1)</sup> [mm]	L 11 [mm]	B 4 [mm]	H 3 [mm]
ZFR 20000	8999	7160	5575	1075	3817	3700	4819	4057	678	1500	2870
ZFR 23000	9389	7550	5825	1215	4017	3900	5023	4246	678	1500	3059
ZFR 28000	10598	8570	6655	1355	4117	4000	5232	4350	748	1500	3163
ZFR 30000	10598	8670	6655	1355	4317	4200	5607	4522	748	1800	3350
ZFR 35000	10409	9090	7075	1355	4517	4400	5792	4712	748	1900	3540
ZFR 40000	10598	9340	7325	1355	4617	4400	5609	4712	748	1900	3540
ZFR 50000	10604	9780	7575	1495	4817	4700	6407	5085	818	1900	3853
ZFR 55000	11139	10530	8325	1495	4817	4700	6187	5085	818	1900	3853

UNIVERSAL High pressure steam boiler Type	Base frame							Universal column IPB - HEB - DIN 1025 [mm]
	L 5 [mm]	L 6 [mm]	L 7 [mm]	L 8 [mm]	L 9 [mm]	L 10 [mm]	B 3 [mm]	
ZFR 20000	4325	3725	925	625	300	225	2470	260
ZFR 23000	4575	3975	925	625	300	225	2600	280
ZFR 28000	5225	4625	925	625	300	225	2700	300
ZFR 30000	5375	4775	850	550	300	225	2800	300
ZFR 35000	5500	4900	950	650	300	225	2900	300
ZFR 40000	5500	4900	1120	820	300	225	2900	300
ZFR 50000	5500	4900	1325	1025	300	425	3100	300
ZFR 55000	6250	5650	1325	1025	300	425	3100	300

- References and defaults to Requirements for the boiler installation room see technical information **T1024**.
  - Equipment and complete dimensions in accordance with project-related, technical data sheet.
  - The boiler operating weight must be absorbed by the foundation in the area of the front and rear supports.
  - Dimensions with  $\pm 1\%$  tolerance.
  - The dimensions are designed for standard insulation:
    - 150 mm thick on the boiler ends
    - 175 mm thick at the rear end
    - 100 mm thick on the boiler shell
  - Dimension of the insertion openings
    - opening height: Add at least 100 mm to H1 or H2 (with / without assembled fittings)
    - opening width: Add at least 200 mm to B1 or B2 (with / without assembled fittings)
  - The height of the boiler house is determined by the system equipment, the clear passage over the operating platform should be at least 2 m.
- 1) Smallest transport dimensions with 100 mm insulation thickness if fittings, pump bracket and burner are removed (without cable ducting; with cable ducting +75 mm on right).
- 2) Dimension L1 is an standard gauge and depends on the make, type and rated capacity of burner.
- 3) The dimension H1 may vary depending on the valve manufacturer.
- 4) The boiler type ZFR 28000 has basically 2 desalting nozzles.
- 6) In case of superheater boiler ZFR-X, dimension L2 increases. See data sheet DA003 Fire Tube Dimensions and Burner Add-On Limits.

**Figura 11.84.** Ficha de todos los modelos de la caldera de vapor UNIVERSAL ZFR con medidas de construcción.

Según las **figuras 11.83 y 11.84**, se ha acabado escogiendo el modelo ZFR-20000 por su gran capacidad de caudal de vapor de agua de 20000 kg/h y según nuestras necesidades de 11435 kg/h. Así mismo, para la producción de vapor de Dowtherm A, se han escogido dos calderas modelo ZFR-55000 debido al caudal de vapor a tratar, en este caso 109.000 kg/h.

## 11.10.2 Caldera de agua sobrecalentada

### 11.10.2.1 Diseño de la caldera de agua sobrecalentada

El agua sobrecalentada es agua cuya temperatura está comprendida entre el punto de ebullición (100 °C) y la temperatura crítica (374 °C). En la planta ETHOXID se necesitará agua sobrecalentada para mantener una correcta refrigeración de los reactores. Es por esta razón que se necesitará una caldera de agua sobrecalentada para generar agua que se usará como refrigerante de los dos reactores operativos.

El agua sobrecalentada estará a 190°C y será sometida a una presión de 12.6 bares para que no cambie de fase al sobrepasar el punto de ebullición. Así mismo, el caudal necesario de agua y según se ha determinado en el apartado de caudal de agua de refrigeración de los reactores del manual, es de 7,98 kg/s por cada reactor, es decir, un total de 15,96 kg/s de caudal de agua a sobrecalentar a 190°C. Dicha agua está diseñada para estar en un circuito cerrado y evitar el continuo de agua.

Una vez se ha determinado la cantidad total agua necesaria, cabe especificar que el caudal de agua de entrada a la caldera de agua sobrecalentada se encuentra a condiciones de 25°C.

A continuación, se procede al cálculo de los parámetros necesarios para el diseño de la caldera, es decir, su potencia:

- Potencia de la caldera de agua sobrecalentada:

Para la determinación de la potencia útil de la caldera de agua sobrecalentada será necesario conocer el caudal total necesario de agua de refrigeración y las entalpías de entrada y salida del agua a 40°C y 190°C, debido a que el agua de entrada proviene de la EDAR dónde se precalienta para que el salto térmico de la caldera no sea descabellado:

$$\text{Ecuación 11.262 } Q_{cu} = m_v \cdot (h_v - h_w) = 57.456 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{ s}} \left( 780 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 350 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 6.863 \text{ kW}$$

Dónde:

$Q_c$  = potencia de la caldera (kW)

$m_v$  = caudal másico de agua sobrecalentada necesaria (kg/h)

$h_v$  = entalpía del agua caliente de salida (kJ/kg)

$h_w$  = entalpía del agua fría de entrada (kJ/kg)

La caldera de agua sobrecalentada será diseñada para producir 57.456 kg/h de agua sobrecalentada, en este caso, dispondrá de una potencia útil será de 6.863 kW.

No obstante, se ha considerado que la caldera de agua sobrecalentada dispone únicamente de un 95% de rendimiento, por lo que la potencia real pasará a ser:

$$\text{Ecuación 11.263 } Q_c = \frac{Q_{cu}}{\eta} = \frac{6.863 \text{ kW}}{0,95} = 7224 \text{ kW}$$

Dónde:

$Q_c$  = potencia real de la caldera de agua sobrecalentada (kW)

$Q_{cu}$  = potencia útil de la caldera de agua sobrecalentada (kW)

$\eta$  = rendimiento de la caldera

#### 11.10.2.2 Elección de la caldera de agua sobrecalentada

Una vez se han calculado tanto la potencia como la cantidad de combustible necesario, se ha decidido optar por una caldera UT-M de la marca Bosch, vendida por la empresa VYC Industrial, [25]. Estas calderas son generadoras de agua caliente pirotubular de tres pasos de humos existente en distintas dimensiones que se puede utilizar en instalaciones que combinan varias calderas.



de agua sobrecalentada pirotubular y de tres pasos de humos y disponible en distintas dimensiones, con posibilidad de uso en combinación con varias calderas.

Ideal para centrales de calefacción pero debido a su versatilidad en prestaciones este generador permite instalarse en distintos sectores de la industria.

**Ventajas:**

- Eficiencia mínima de un 95% con posibilidad de instalar un intercambiador de condensación que aumentaría la eficiencia hasta un 105% (según EN12953 – Part 11 – Método indirecto).
- Aislamiento térmico eficaz que reduce las pérdidas por radiación.
- Combustión con bajas emisiones.
- Compatible con todos los sistemas de quemadores.
- Mantenimiento simple.



Modelo	UT-M
Fluido	Agua sobrecalentada
Tipo	Generador de agua sobrecalentada pirotubular, 3 pasos y horizontal
Producción	de 650 a 19.200 kW
Presión de diseño	hasta 16 bar
Temperatura máx.	hasta 190 °C
Combustibles	Gas natural, gasóleo

**Figura 11.85.** Ficha técnica de la caldera de vapor UT-M de la marca Bosch.

Según la **figura 11.85**, se ha acabado escogiendo el modelo UT-M por su elevado rendimiento del 95% y debido al alto rango de potencias que soporta, entre 650 y 19.200 kW, siendo el caso de la planta ETHOXID de 7224 kW.

### 11.10.3 Consumo de combustible

En este apartado, y una vez determinada la potencia real de la caldera de vapor de agua y de Dowtherm A y la del agua sobrecalentada, se procede al cálculo de la cantidad de combustible, en este caso gas natural, que necesitarán las calderas de la siguiente manera, a partir de su poder calorífico superior, [2]:

$$\text{Ecuación 11.264 } m_{comb,H2O} = \frac{Q_c}{PCS} = \frac{5231 \text{ kW}}{11,70 \text{ kWh/Nm}^3} = 447 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 3.332.950 \frac{\text{Nm}^3}{\text{año}} = 38.995.515 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$\text{Ecuación 11.265 } m_{comb,DowA} = \frac{Q_c}{PCS} = \frac{7832 \text{ kW}}{11,70 \text{ kWh/Nm}^3} = 668 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 5.130.240 \frac{\text{Nm}^3}{\text{año}} = 55.023.808 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$\text{Ecuación 11.266 } m_{comb,agua 190^\circ\text{C}} = \frac{Q_c}{PCS} = \frac{7224 \text{ kW}}{11,70 \text{ kWh/Nm}^3} = 617 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 4.741.908 \frac{\text{Nm}^3}{\text{año}} = 50.480.320 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Dónde:

$m_{comb}$  = caudal volumétrico de gas natural como combustible (Nm<sup>3</sup>/h)

PCS = poder calorífico superior del gas natural como combustible (kWh/Nm<sup>3</sup>)

## 11.10.4 Torres de refrigeración

### 11.10.4.1 Diseño de la torre de refrigeración

En la planta ETHOXID es necesario el uso de agua, en este caso, como líquido refrigerante, por lo que será necesario disponer de torres de refrigeración. Estas son un circuito cerrado con una eficiencia muy elevada y que se encuentran completamente aisladas de la atmosfera para mantener el fluido limpio y sin suciedad del aire. Cabe especificar que en la planta se usarán agua a 25°C y a 5°C, pero únicamente será necesario disponer de una torre de refrigeración, ya que el agua a 5°C será tratada en un Chiller. Así mismo, todo el caudal de agua usado para refrigerar también está diseñado en un circuito cerrado para reducir el consumo.

**Tabla 11.23.** Caudales de agua de refrigeración a 25°C para los intercambiadores E-201, 301, 400, 500 y 502.

Equipo	Temperatura Entrada (°C)	Caudal (kg/h)
E-201	25	120.000
E-301	25	4.000
E-400	25	181.000
E-500	25	54.046
E-502	25	177.783
<b>Caudal total de agua de refrigeración a 25°C (kg/h)</b>		<b>536.829</b>

Una vez se ha determinado la cantidad total de agua de refrigeración necesaria para la torre a 25°C, a continuación, se procede al cálculo de los parámetros necesarios para su diseño: potencia o calor a disipar.

- Potencia de refrigeración o calor a disipar:

$$\text{Ecuación 11.267 } Q_T = m_T \cdot C_P \cdot \Delta T$$

Dónde:

$Q_T$  = potencia de refrigeración (kW)

$m_T$  = caudal de agua de refrigeración (kg/h)

$C_P$  = calor específico del agua ( $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ )

**Potencia de refrigeración o calor a disipar de la torre a 25°C:**

$$\text{Ecuación 11.268 } Q_{T25} = m_T \cdot C_P \cdot \Delta T = 536.829 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{4,18 kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (35^\circ C - 25^\circ C) = 5991 kW$$

#### 11.10.4.2 Elección de la torre de refrigeración

Una vez se conoce las toneladas nominales de refrigeración o la potencia disipada por la columna en kW, se procede a la elección de las torres, en este caso, mediante la empresa EWK, [9].

Para el caso de la torre a 25°C, se ha decidido escoger la torre modelo EWK-B para condiciones externas a 30°C, tal y como se puede observar en la siguiente figura:

Modelo	*Disipación kw	Peso vacío kg	Peso servicioventilador kg	Potencia kw	Largo mm	Ancho mm	Alto mm	Plano Dim. Balsa de Hormigón	Plano Dim. Balsa de Poliéster	Car. Técnicas
EWB 1730	2766	3500*	4900*	22,0	3700*	4902*	4807*	++	++	+
EWB 2300	3677	4700*	6600*	22,0	4900*	4902*	4807*	++	++	+
EWB 2875	4597	6800*	9200*	30,0	4900*	6102*	5106*	++	++	+
EWB 3600	5756	8515*	11520*	37,0	6100*	6102*	5106*	++	++	+
EWB 3460	5332	6800*	8600*	2x22,0	7350*	4902*	4807*	++	++	+
EWB 4600	7355	8800*	12300*	2x22,0	9750*	4902*	4796*	++	++	+
EWB 5750	9193	11600*	16400*	2x30,0	9750*	6102*	5106*	++	++	+
EWB 7200	11512	14525*	20535*	2x37,0	12150*	6102*	5106*	++	++	+

**Figura 11.86.** Ficha técnica de la torre de refrigeración EWB de la marca EWK.

Tal y como se ha calculado anteriormente, la disipación de la torre a 25°C es de 5991 kW aproximadamente por lo que, tal y como se puede observar en a **figura 11.86**, se ha escogido la torre modelo EWB-4600 que dispone de una disipación máxima de 7355 kW.

### 11.10.5 Gas natural

En este caso, la conexión de este servicio se realiza a pie de planta de la parcela y con una presión media de 1,5 kg/cm<sup>2</sup>. Dicho servicio se necesitará como combustible para las calderas de vapor, caldera de agua sobrecalentada, grupos electrógenos y el agua sanitaria usada en las oficinas, siendo este un 10% del total de las calderas:

**Tabla 11.24.** Estimación del consumo del combustible de la planta: gas natural.

Usos	Caudal de combustible (Nm <sup>3</sup> /h)
Calderas de vapor	1.732
Servicios sanitarios	173,2
<b>Caudal total de combustible (Nm<sup>3</sup>/h)</b>	<b>1.905,2</b>

### 11.10.6 Nitrógeno

El nitrógeno gas es otro importante servicio en la planta ya que resulta adecuado para varias aplicaciones, como manipulación de equipos y almacenamiento de productos.

En ETHOXID se utilizará el nitrógeno para garantizar un almacenamiento seguro del óxido de etileno, y para inertizar los tanques y mantener un espacio en el cual no haya posibilidad de descomposición o polimerización del óxido de etileno. También se utiliza para desplazar la humedad y contaminantes del sistema en la puesta en marcha, haciendo circular primeramente nitrógeno por todos los equipos antes de su utilización. Para poder estimar la cantidad exacta de nitrógeno usado para operaciones de inertización en la puesta en marcha, se ha estimado como el 15% del volumen de los equipos más voluminosos del proceso, obteniendo:

**Tabla 11.25.** Consumo de nitrógeno en m<sup>3</sup>/h para las operaciones de inertización en la puesta en marcha.

Equipo	Volumen (m <sup>3</sup> )	Nitrógeno (m <sup>3</sup> /h)
R-200A	60	9
R-200B	60	9
C-300	130	19,5
T-300	50	7,5
C-400	85	12,8
C-401	47	7
C-402	128	19,2
C-500	25	3,8
T-500	33,5	5
C-501	89	13,4
T-600A, T-600B, T-600C, T-600D, T-600E, T-600F	1500	225
<b>Caudal total de nitrógeno de inertización (m<sup>3</sup>/h)</b>		<b>331,2</b>

---

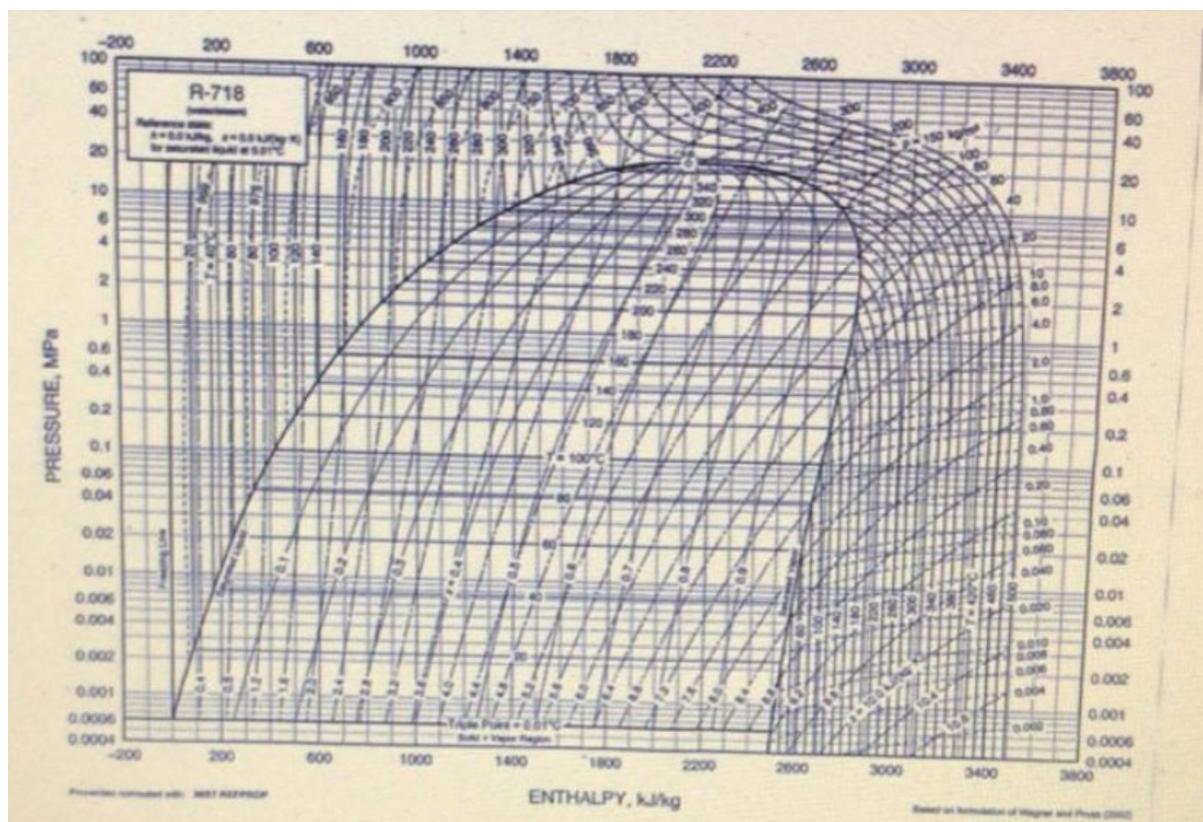
### 11.10.7 Turbina de vapor

#### 11.10.7.1 Diseño de la turbina de vapor

En el proceso químico que tiene lugar en la planta ETHOXID de generación del óxido de etileno a partir de oxígeno y etileno, se genera una gran exotermia producida por la propia reacción, generando una gran cantidad de vapor de agua como resultado del enfriamiento de los reactores. Es por esa razón que se ha instalado un sistema de cogeneración mediante una turbina de vapor que aproveche dicho vapor generándonos electricidad en forma de kW.

En primer lugar, será necesario determinar cuál es el caudal másico de refrigerante, en este caso agua, que se usará en los reactores para refrigerar por carcasa ( $m = 7,98 \text{ kg/s}$ ). Dicha agua entra a 15 bares y a una temperatura de unos  $190^\circ\text{C}$  (punto de ebullición).

En segundo lugar, se procede a determinar el cálculo de la diferencia de entalpías entre el vapor de agua de la salida del reactor y entrada de la turbina y el vapor de agua de salida de la turbina. Para poder determinar las entalpías se usa la siguiente figura que representa el diagrama psicométrico del agua como refrigerante R-718.



**Figura 11.87.** Diagrama psicométrico del agua como refrigerante R-718.

Para poder determinar la entalpía de salida de la turbina, se ha supuesto que el vapor de agua saldrá a 0,2 bares y 50°C. Según se puede observar en la **figura 11.87**, la entalpía de entrada del vapor de agua a 15 bares y 190°C es de 2920 kJ/kg y la del vapor a 0,2 bares y 50°C es de 2150 kJ/kg. Por tanto, la diferencia de entalpías es la siguiente:

$$\text{Ecuación 11.269 } \Delta H = 2920 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2150 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 790 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Por último, se procede al cálculo de la potencia generada por el eje de la turbina de vapor, teniendo en cuenta que el rendimiento de la turbina es del 80%:

$$\text{Ecuación 11.270 } P = m \cdot \Delta H \cdot 0,8 = 15,96 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 790 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,80 = 10.086,72 \text{ kW}$$

Por tanto, estos 10086 kW serán los kW que se generen de electricidad y que se podrán descontar del consumo total de electricidad de la planta, disminuyendo así el coste de este.

### 11.10.7.2 Elección de la turbina de vapor

Una vez se conoce que la potencia total generada es de aproximadamente 10MW, se ha buscado una turbina de la empresa De Pretto Industrie, [7], que disponen de una turbina de hasta una potencia generada de 50MW y rangos de presión de entre 2,5 a 130 bares. Algunas especificaciones son las siguientes:

## General design data

Power	P	up to 50 MW
Live steam data	$p_L - T_L$	Pressure / Temperature categories: 60 bar – 450 °C 63 bar – 485 °C 130 bar – 530 °C
Exhaust pressure	$P_B$	Condensing turbines: up to 1 bar Back-pressure turbines: up to 50 bar
Extraction pressure	$P_e$	2 up to 50 bar
Rotating speed	N	Driving generators: 3000 or 3600 rpm if direct, up to 17000 rpm through reduction gear  Driving units like compressors: 3000 up to 17000 rpm (depending on size)

**Figura 11.88.** Ficha técnica de la turbina de vapor de la marca De Pretto Industrie.

## 11.10.8 Chiller

### 11.10.8.1 Diseño del Chiller

Para poder refrigerar o enfriar los intercambiadores que usan agua a 5°C se realiza mediante un Chiller como equipo refrigerante, debido a que las torres de refrigeración no son capaces de refrigerar hasta una temperatura tan baja de 5°C. A continuación, se especifican las necesidades de refrigerante que se necesitan en los intercambiadores:

**Tabla 11.26.** Caudales de agua de refrigeración a 5°C para los intercambiadores E-300 y E-401.

Equipo	Temperatura Entrada (°C)	Caudal (kg/h)
E-300	5	49.000
E-401	5	15.000
Caudal total de agua de refrigeración a 5°C (kg/h)		50.500

A continuación, se calcula la potencia útil necesaria referente al Chiller, y teniendo en cuenta que se enfriará agua de -15 a 5°C:

$$\text{Ecuación 11.271 } Q_{CHu} = m \cdot Cp \cdot (\Delta T) = 50500 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{4,18 kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (5^\circ C - (-15^\circ C)) = 568 kW$$

Teniendo en cuenta que el rendimiento del Chiller será de aproximadamente del 85%, la potencia real del equipo será el siguiente:

$$\text{Ecuación 11.272 } Q_{CHr} = \frac{Q_{CHu}}{\eta} = \frac{568 kW}{0,85} = 668 kW$$

Por tanto, la potencia real de dicho equipo será de 668 kW aproximadamente, por lo que a continuación se procede a la elección en el mercado de un Chiller que disponga de dichos consumos.

### 11.10.8.2 Elección del Chiller

Una vez conocidos los siguientes parámetros se procede a la búsqueda del Chiller. El Chiller que se ha escogido pertenece a la empresa Custom Chill, y el modelo es el CRAL700DRHP, [6]. Este Chiller puede llegar a proporcionar una potencia máxima de hasta 700 kW, por lo que es perfecto para nuestro caso debido a que disponemos de una potencia máxima de 668 kW.

### 11.10.9 Agua del proceso a descalcificar y desmineralizar

El agua descalcificada y desmineralizada se utilizará en las calderas para producir vapor, en las torres de refrigeración y posteriormente en los intercambiadores de calor, en los reactores, para las absorciones y, por último, para el consumo personal de los trabajadores. El objetivo de quitar las sales y los minares al agua es evitar problemas de formación de incrustaciones, corrosión y contaminación tanto en los equipos como en las tuberías por las que circulará el agua.

Para obtener el agua a estas condiciones, el agua de red pasará por los tratamientos necesarios, como una desmineralización de agua por intercambio iónico con resinas catiónicas y ósmosis inversa y procesos de descalcificación en el área A-1000 de servicios. A continuación, se ha estimado el consumo aproximado del agua de proceso a tratar:

**Tabla 11.26.** Caudal total de agua a descalcificar y desmineralizar en el A-1000.

Agua para tratar	Caudal (kg/h)
Refrigeración de los reactores	57.456
Intercambiadores de calor	598.764
Absorción	108.111
Consumo personal de los trabajadores	1.125,6
<b>Caudal total para tratar (kg/h)</b>	<b>765.445,6</b>
<b>Caudal total para tratar (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>765,4</b>

Tal y como se observa en la **Tabla 11.26**, al consumo total calculado, hará falta añadir el consumo personal de cada trabajador que se ha supuesto de unos 75 L/día y, teniendo en cuenta que al día cada trabajador únicamente realiza 8 horas, será un consumo de 9,38 kg/h. Así mismo, sabiendo que hay un total de 120 trabajadores en la planta, el consumo total será de 1125,6 kg/h.

Además, cabe especificar que en el caso del agua para las operaciones de absorción se ha tenido en cuenta las de las áreas A-300 y A-500 en las columnas C-300 y C-500. Para el caso de los intercambiadores de calor sería toda aquella agua tratada en las torres de refrigeración, Chiller y en las calderas de vapor de agua. Así mismo, cabe especificar también que, quitando el consumo de agua de red en las operaciones de absorción, todos los otros consumos de agua serán mediante un circuito cerrado en el que únicamente se deberán añadir algún tipo de reposición por posibles pérdidas. Así mismo, se usan 4 descalcificadoras de la marca Culligan y el modelo es Ultraline HB 1700.

### 11.10.10 Estación transformadora y grupo electrógeno

En este apartado se pretende determinar los kW totales necesarios de electricidad que son necesarios en la planta juntando los diferentes equipos que requieren de dicha electricidad. Para el caso en especial de las oficinas y edificios externos a la planta se estima un 10% de la potencia de toda la planta:

**Tabla 11.27.** Estimación del consumo eléctrico de la planta en KWh.

Equipo	Potencia (kW)
TR-01	74
CH-01	668
K-100	2910
K-101	9455
K-400	108
K-500	5928
P-300	282
P-301	277
P-400	19
P-401	2,5
P-500	539
P-501	178
CV-01	5231
CV-02 Dowtherm A	3416
CV-03 Dowtherm A	3416
CV-04 agua sobrecalentada	7224
Oficinas y edificios externos (10%)	3.973
<b>Total (kW)</b>	<b>41.700</b>

Una vez se han estimado los kW totales de consumo eléctrico, se procede a calcular la potencia aparente (kVA) que debería tener el equipo transformador sería el siguiente:

$$\text{Ecuación 11.273 } P_{transformador} = 41.700 \text{ kW} \cdot 1 \text{ kVA} / 0,85 \text{ kW} = 49.059 \text{ kVA}$$

Por último, el equipo comercial que más se ajusta a dicha potencia calculada ha sido un transformador de la empresa *Siemens*, con capacidad de entre 20 y 1000 MVA, por lo que se ha escogido uno con potencia de 50 MVA, [21]:

## Power Transformers



Specializing in reliable solutions with maximum efficiency and availability. Siemens Transformers support grid operators in giving their customers state-of-the-art equipment and energy that is safe and affordable.

Tailored to meet specific customer needs - Daily savings with efficient transformers - Investment pay-offs - Eco-friendly

Find out how our innovations are shaping the future of transformers

> See current highlights

**Figura 11.89.** Transformador de potencia 50.000 kVA de la empresa Siemens.

Así mismo, en el caso de que hubiera un fallo en el suministro eléctrico del transformador, sería necesario y recomendable disponer de un grupo electrógeno alternativo de emergencia para poder mantener en funcionamiento los servicios indispensables de la planta. Dicho equipo se ha decidido usar un generador de electricidad de la empresa Siemens, modelo: *SGen-100A/SGen-1000A 2p series*, [22]. Dicho equipo funciona mediante aire frío y tiene capacidades de entre 25-370 MVA, por lo que podría suplir a la perfección nuestras necesidades eléctricas.

SIEMENS [Products & Services](#) > [Energy](#) > [Power Generation](#) > [Generators](#) > [SGen-100A/1000A generator series | 25-370 MVA](#)

## SGen-100A/SGen-1000A generator series

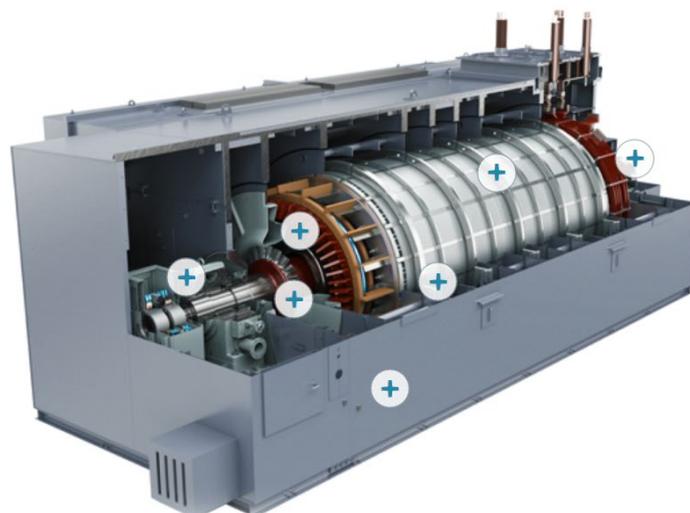
Proven two-pole air-cooled generator for industrial and large power applications

Performance range

# 25-370 MVA

Efficiency up to 98.9%

Highly efficient generator for sustainable power supply



**Figura 11.90.** Grupo electrógeno de la empresa Siemens de potencia entre 25 y 370 MVA.

## 11.11 Diseño de tuberías

Para poder llevar a cabo el transporte de las diferentes corrientes del proceso y de servicios por la planta de ETHOXID, es necesario llevar a cabo el diseño de las distintas tuberías que forman parte de la planta. El primer paso para realizar su diseño es definir los siguientes parámetros para cada corriente, y por lo tanto, para cada tubería:

- Caudal volumétrico de la corriente que circulará por la tubería
- Fluido que circula por la tubería
- Presión y temperatura de trabajo

Posteriormente se elige el material del cual serán las tuberías, en este caso, y por los motivos explicados en el **Capítulo 4**, se ha elegido el Acero Inoxidable 316L (SS316L).

Una vez elegido el material y definidos los parámetros de las corrientes que circularán por las tuberías, se procede a suponer una velocidad de circulación del fluido que se encuentre dentro del rango típico de velocidades que se puede observar en la **Tabla 11.28**, para de esta manera poder menospreciar las pérdidas de carga que habría en cada tubería. Dichas velocidades típicas dependen de si el fluido se encuentra en estado gas o líquido y del tipo de conducción de la que se trate (entrada de bomba, salida de bomba, línea de conducción, etc).

**Tabla 11.28.** Velocidades típicas de circulación de fluidos por tuberías.

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5 – 1	0.15 – 0.30
	Entrada de bomba	1 – 3	0.3 – 0.9
	Salida de bomba	4 – 10	1.2 – 3
	Línea de Conducción	4 – 8	1.2 – 2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2 – 0.5	0.06 – 0.15
	Salida de bomba	0.5 – 2	0.15 – 0.6
Vapor de Agua		30 – 50	9 – 15
Aire o gas		30 – 100	9 – 30

Para las corrientes de gases se han elegido velocidades dentro del rango de 9-30 m/s. Para corrientes líquidas de 0,3-0,9 m/s si se trata de una corriente que entra a una bomba y 1,2-3,0 m/s si es una corriente que sale de una bomba, para el resto de tuberías 1,2-2,4 m/s.

Una vez supuestas las velocidades de cada corriente se procede a realizar el cálculo del diámetro interno con la **Ecuación 11.274** utilizando el valor del caudal volumétrico que circula por la tubería y la velocidad típica supuesta.

$$\text{Ecuación 11.274 } v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \text{ aislando } \rightarrow Di = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot v}}$$

Donde:

$A$  = área de sección de la tubería ( $m^2$ )

$Di$  = diámetro interno de la tubería (m)

$Q$  = caudal volumétrico que circula por la tubería ( $m^3/s$ )

$v$  = velocidad típica supuesta de circulación del fluido por la tubería (m/s)

El diámetro interno calculado será el necesario para conseguir la velocidad típica supuesta. Sin embargo, se debe determinar la medida real del diámetro. Para esto, se procede a utilizar la **Tabla 11.29** donde se encuentran diferentes valores de diámetros externos para tuberías de acero inoxidable reales, y el grueso de las paredes dependiendo del Schedule elegido. Por lo tanto, para poder utilizar esta tabla será necesario también definir el Schedule de la tubería.

Se empezará por elegir un Schedule 10S y se elegirá un diámetro externo (OD, mm) mayor pero similar al diámetro interno calculado, posteriormente se determinará el valor del grueso de las paredes de la tubería (Nominal Wall Thickness) para el Schedule de 10S, y se calculará la máxima presión admitida por la tubería con la **Ecuación 11.275**, obtenida a partir del **Código de tuberías a presión ASME B31.3, [19]**.

$$\text{Ecuación 11.275 } P = \frac{2 \cdot t \cdot S \cdot E}{D - 2 \cdot t \cdot Y}$$

Donde:

$P$  = presión máxima admisible (psi)

$t$  = grueso de las paredes de la tubería (in)

$S$  = tensión de tracción permitida por el material de la tubería a la temperatura de diseño (psi)

$E$  = factor de calidad de la tubería de acuerdo con el código ASME B31.3

$D$  = diámetro externo de la tubería (in)

$Y$  = coeficiente del grueso de la pared de acuerdo con el código ASME B31.3, [19]. Este coeficiente se toma en cuenta la suma de las tolerancias mecánicas de la tubería las tolerancias de corrosión y erosión del material.

Tabla 11.29. Dimensiones de tuberías reales para diferentes diámetros externos.

Nominal Pipe Size		Outside Diameter (mm)	Nominal Wall Thickness Schedule																		
NPS	DN		OD	SCH 5s	SCH 10s	SCH 10	SCH 20	SCH 30	SCH 40s	SCH STD	SCH 40	SCH 60	SCH 80s	SCH XS	SCH 80	SCH 100	SCH 120	SCH 140	SCH 160	SCH XXS	
1/8	6	10.3		1.24				1.73	1.73	1.73		2.41	2.41	2.41							
1/4	8	13.7		1.65				2.24	2.24	2.24		3.02	3.02	3.02							
3/8	10	17.1		1.65				2.31	2.31	2.31		3.20	3.20	3.20							
1/2	15	21.3	1.65	2.11				2.77	2.77	2.77		3.73	3.73	3.73					4.78	7.47	
3/4	20	26.7	1.65	2.11				2.87	2.87	2.87		3.91	3.91	3.91					5.56	7.82	
1	25	33.4	1.65	2.77				3.38	3.38	3.38		4.55	4.55	4.55					6.35	9.09	
1 1/4	32	42.2	1.65	2.77				3.56	3.56	3.56		4.85	4.85	4.85					6.35	9.70	
1 1/2	40	48.3	1.65	2.77				3.68	3.68	3.68		5.08	5.08	5.08					7.14	10.15	
2	50	60.3	1.65	2.77				3.91	3.91	3.91		5.54	5.54	5.54					8.74	11.07	
2 1/2	65	73	2.11	3.05				5.16	5.16	5.16		7.01	7.01	7.01					9.53	14.02	
3	80	88.9	2.11	3.05				5.49	5.49	5.49		7.62	7.62	7.62					11.13	15.24	
3 1/2	90	101.6	2.11	3.05				5.74	5.74	5.74		8.08	8.08	8.08							
4	100	114.3	2.11	3.05				6.02	6.02	6.02		8.56	8.56	8.56		11.13			13.49	17.12	
5	125	141.3	2.77	3.40				6.55	6.55	6.55		9.53	9.53	9.53		12.70			15.88	19.05	
6	150	168.3	2.77	3.40				7.11	7.11	7.11		10.97	10.97	10.97		14.27			18.26	21.95	
8	200	219.1	2.77	3.76		6.35	7.04	8.18	8.18	8.18	10.31	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	20.62	23.01	22.23		
10	250	273.1	3.40	4.19		6.35	7.80	9.27	9.27	9.27	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	21.44	25.40	28.58	25.40		
12	300	323.9	3.96	4.57		6.35	8.38	9.53	9.53	10.31	14.27	12.70	12.70	17.48	21.44	25.40	28.58	33.32	25.40		
14	350	355.6	3.96	4.78	6.35	7.92	9.53		9.53	11.13	15.09		12.70	19.05	23.83	27.79	31.75	35.71			
16	400	406.4	4.19	4.78	6.35	7.92	9.53		9.53	12.70	16.66		12.70	21.44	26.19	30.96	36.53	40.49			
18	450	457.2	4.19	4.78	6.35	7.92	11.13		9.53	14.27	19.05		12.70	23.83	29.36	34.93	39.67	45.24			
20	500	508	4.78	5.54	6.35	9.53	12.70		9.53	15.09	20.62		12.70	26.19	32.54	38.10	44.45	50.01			
22		559	4.78	5.54	6.35	9.53	12.70		9.53		22.23		12.70	28.58	34.93	41.28	47.63	53.98			
24	600	610	5.54	6.35	6.35	9.53	14.27		9.53	17.48	24.61		12.70	30.96	38.89	46.02	52.37	59.54			
26		660			7.92	12.70			9.53				12.70								
28	700	711			7.92	12.70	15.88		9.53				12.70								
30		762	6.35	7.92	7.92	12.70	15.88		9.53				12.70								
32	800	813			7.92	12.70	15.88		9.53	17.48			12.70								
34		884			7.92	12.70	15.88		9.53	17.48			12.70								
36	900	914			7.92	12.70	15.88		9.53	19.05			12.70								

Primeramente, para obtener los valores de S para la **Ecuación 11.275** (tensión de tracción permitida por el material de la tubería a la temperatura de diseño) se ha utilizado la siguiente tabla. [5].

**Tabla 11.30** Tensión de tracción S permitida por el acero inoxidable 316L a diferentes temperaturas de diseño.

Type/Grade	F321	F316L	TP316L
-30 to 40°C [MPa]	138	115	97.9
≤ 65°C [MPa]	130	106	97.9
≤ 100°C [MPa]	123	96.3	97.9
≤ 125°C [MPa]	118	91.3	97.9
≤ 150°C [MPa]	114	87.4	97.9
≤ 200°C [MPa]	106	81.2	93.0
≤ 250°C [MPa]	99.7	76.0	87.2
≤ 300°C [MPa]	94.5	72.5	82.9
≤ 325°C [MPa]	92.3	71.2	81.6
≤ 350°C [MPa]	90.7	70.0	80.2
≤ 375°C [MPa]	89.4	68.8	78.4
≤ 400°C [MPa]	87.5	67.5	77.2
≤ 425°C [MPa]	88.9	66.3	75.9

Los valores utilizados son los de la columna TP316L ya que hacen referencia a *Tubular Products* (TP) del material SS316L. Dependiendo de la temperatura de diseño de la tubería se ha seleccionado un valor u otro para S. Para obtener la temperatura de diseño de la tubería se han aplicado las indicaciones del **Capítulo 4. Tuberías, válvulas y accesorios**.

Seguidamente, para obtener el valor de Y de la **Ecuación 11.275**, se ha utilizado la **Tabla 11.31**, que ha sido obtenida del código ASME B31.3 (**tabla 304.1.1**). [16].

Debido a que todas las tuberías se encontrarán a menos de 482°C y el acero inoxidable 316L es un acero austenítico, se tiene un coeficiente  $Y=0.4$  para todos los casos. Como se ha mencionado antes, este coeficiente Y tendrá en cuenta la suma de las tolerancias mecánicas de la tubería, las tolerancias de corrosión y la erosión del material.

**Tabla 11.31.** Coeficientes del grueso de la pared Y de acuerdo con el código ASME B31.3.

Materiales	Temperatura, °C (°F)					
	≤ 482 (900 y menores)	510 (950)	538 (1.000)	566 (1.050)	593 (1.100)	≤ 621 (1.150 y mayores)
Aceros Ferríticos	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
Aceros Austeníticos	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Otros metales ductiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Hierro Fundido	0,0	...	...	...	...	...

El factor de calidad de la tubería E, se ha obtenido de la **Tabla 11.32** de acuerdo con el **código ASME B31.3 [23]**. Las tuberías en ETHOXID se tratan de tuberías tipo A312 que son tuberías austeníticas de acero inoxidable que han pasado el examen radiográfico al 100%. Por lo tanto se tiene un valor de E=1.

**Tabla 11.32.** Factores de calidad E para diferentes tipos de tuberías.

Spec no.	Class (or Type)	Description	E	Notes
A182	-	Forgings and Fittings	1.00	-
A268	-	Seamless Tube	1.00	-
	-	Electric Fusion Welded Tube, Double Butt Seam	0.85	-
	-	Electric Fusion Welded Tube, Single Butt Seam	0.80	-
A269	-	Seamless Tube	1.00	-
	-	Electric Fusion Welded Tube, Double Butt Seam	0.85	-
	-	Electric Fusion Welded Tube, Single Butt Seam	0.80	-
A312	-	Seamless Pipe	1.00	-
	-	Electric Fusion Welded Pipe, Double Butt Seam	0.85	-
	-	Electric Fusion Welded Pipe, Single Butt Seam	0.80	-

Una vez obtenidos E, S e Y, se obtiene la máxima presión admitida con la **Ecuación 11.275** y posteriormente se multiplica por 0.875, es decir la máxima presión admitida será finalmente un 87.5% de la calculada con la **Ecuación 11.275** para de esta manera tener un margen de seguridad del 12.5%.

Posteriormente, se calculará el porcentaje de sobrepresión que admite la tubería con respecto a la presión de diseño que será 1,2 veces la presión de trabajo salvo en excepciones (mirar **Capítulo 4.**). Si el porcentaje de sobrepresión admitida es menor a un 20% se procederá a escoger un Schedule mayor (20S, 30S, 40S, 80S o XS) y se realizará el cálculo de presión máxima admitida de nuevo, hasta tener una sobrepresión admitida igual o mayor al 20%

Una vez se tiene definida la tubería, se calcula el diámetro interno real restándole al diámetro externo dos veces el grueso de las paredes de la tubería, y con el diámetro obtenido se calcula el área de sección real de la tubería. Finalmente, se calcula la velocidad real como se indica en la **Ecuación 11.277** ( $v=Q/A$ ) y se comprueba que sea similar a la velocidad supuesta y esté dentro de los rangos de velocidades típicas.

### 11.11.1 Ejemplo de cálculo de tuberías

Se realiza ahora un ejemplo de cálculo de tubería con todo lo explicado antes. En este caso se realiza el diseño de la tubería por la cual circulará la corriente número 1 del proceso. Dicha corriente se encuentra a 40°C, 1000kPa y tiene un caudal volumétrico de 960.45 m<sup>3</sup>/h = 0.267 m<sup>3</sup>/s.

La corriente número 1 es una corriente en estado gas, por lo tanto se supone primeramente una velocidad igual a 25 m/s. Se supone una velocidad más cercana a velocidades elevadas debido a que esta corriente es de etileno, que pasará a mezclarse con las corrientes de oxígeno y nitrógeno, por lo tanto para que la mezcla sea correcta se necesitará una turbulencia elevada en las tuberías de entrada al proceso, y se sabe que a mayor velocidad, mayor número de Reynolds y mayor turbulencia.

Se procede a calcular con la velocidad supuesta y el caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/s) de la corriente 1 el diámetro interno que necesitaría la tubería.

$$\text{Ecuación 11.276 } Di = \sqrt{\frac{0.267 \cdot 4}{\pi \cdot 25}} = 0.11661 \text{ m} = 116.61 \text{ mm}$$

Con el diámetro interno obtenido se procede a buscar en la **Tabla 11.29** en la columna de *Outside Diameter (mm)* un diámetro externo mayor y similar al Di obtenido, en este caso sería un OD de 141.3 mm = 5.56 in. Se comienza eligiendo un Schedule de 10S y por lo tanto se observa en la misma tabla que el grueso de las paredes sería de 3.40 mm = 0.134 in

Se procede a calcular la presión máxima admitida para la tubería con la **Ecuación 11.275**.

$$\text{Ecuación 11.275 } P = \frac{2 \cdot 0.134 \text{ (in)} \cdot 14199.19 \text{ (psi)} \cdot 1}{5.56 \text{ (in)} - 2 \cdot 0.134 \text{ (in)} \cdot 0.4} \rightarrow P = 696.472 \text{ psi}$$

Se multiplica el resultado obtenido por 0.875 para tener en cuenta la disminución en un 12.5% de la presión máxima admitida por seguridad y se obtiene finalmente:

$$P = 609.65 \text{ psi}$$

La presión de trabajo para esta tubería es de 10 bar, que equivale a 145.04 psi, por lo tanto la presión de diseño (1.2 veces la presión de trabajo) será 174.048 psi. Se calcula la sobrepresión con respecto a la presión de diseño y se obtiene un 250% de sobrepresión admitida. Como este porcentaje es superior a 20% la tubería de Schedule 10S será suficiente para evitar problemas de sobrepresión y por lo tanto se continúa a calcular la velocidad verdadera de la tubería.

$$\text{Ecuación 11.277 } v = \frac{Q}{A} = \frac{0.267}{\frac{\pi}{4}(0.1413-2 \cdot 0.0034)^2} = 18.78 \text{ m/s}$$

Como la velocidad se encuentra dentro del rango típico de velocidades de circulación de gases, se considera correcto el diseño de la tubería.

### 11.11.2 Aislamiento de tuberías

Una gran parte de las corrientes que circulan por tuberías tendrán que llegar a los equipos de destino a las temperaturas deseadas, por lo tanto, por este motivo, y por la seguridad de los trabajadores en ETHOXID y de las instalaciones, se ha decidido aislar la mayor parte de las tuberías utilizando lana de roca como aislante térmico.

Para determinar si es necesario o no aislar una tubería se ha seguido el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE), en este se indica que deben ser aisladas las tuberías que se encuentren a temperaturas iguales o superiores a 40°C e iguales o inferiores a 15°C. También se han aislado las tuberías de servicios ya que las corrientes de esta área tendrán que llegar a sus puntos de uso a ciertas condiciones de temperatura para asegurar el funcionamiento correcto de la planta, y tuberías por las cuales circule óxido de etileno ya que en caso de un aumento de temperatura no deseado se puede dar la descomposición o polimerización de este.

Se ha escogido como material de aislamiento la lana de roca por su baja conductividad térmica y demás motivos expuestos en el **Capítulo 4** y el grueso necesario de aislante se ha calculado mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuación 11.278 } d = \frac{D}{2} \left[ \text{EXP} \left( \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \cdot \ln \frac{D+2 \cdot d_{ref}}{D} \right) - 1 \right]$$

Donde:

$\lambda_{ref}$  = Conductividad térmica de referencia a 10°. (W/m·K)

$\lambda$  = Conductividad térmica del material empleado, a la temperatura de la tubería aislada. (W/m·K)

$d_{ref}$  = Espesor mínimo de referencia. (mm)

$D$  = Diámetro interior del material aislante, coincide con el diámetro exterior de la tubería. (mm)

$d$  = Espesor mínimo del aislante. (mm)

La lana de roca utilizada se obtendrá con el proveedor *ISOVER*, y se han utilizado dos tipos de lana de roca, Lana de roca *TECH PIPE Section MT4.1* para tuberías cuyas temperaturas no superaba los 300°C y Lana de roca *TECH Wired Mat MT 6.1* para las tuberías cuya temperatura era igual o superior a 300°C. Para el primer tipo de lana de roca su conductividad conductividad térmica de referencia a 10° es igual a 0,038 (W/m\*K) y para la lana de rocha *TECH wired Mat MT 6.1* es de 0,040 (W/m\*K). [12].

Para obtener la conductividad térmica del material empleado a la temperatura de la tubería aislada se ha utilizado la **Tabla 11.33** a partir de la cual se ha interpolado para obtener la conductividad térmica a la temperaturas que no se encontraban en ella.

**Tabla 11.33.** Conductividades térmicas de las diferentes lanas de roca utilizadas por *ISOVER* a diferentes temperaturas.

Producto	Lana de Vidrio	Lana de Roca	Lana ULTIMATE	Conductividad Térmica (λ)												Reacción al fuego	Formato	Rango T° (°C)
				T°	50	100	150	200	250	300	400	500	550	600	650			
AISLAMIENTO TÉRMICO Y CALORIFUGADO PARA TUBERÍAS																		
TECH PIPE Section MT 4.0	+			λ	0,037	0,043	0,052	0,062	0,074	0,089	-	-	-	-	-	A1	Coquilla	-40-400
TECH PIPE Section MT 4.1		+		λ	0,038	0,045	0,054	0,063	0,073	0,084	-	-	-	-	-	A1	Coquilla	hasta 640
U-TECH PIPE Section MT 4.0			+	λ	0,037	0,043	0,052	0,062	0,074	0,089	-	-	-	-	-	A1	Coquilla	hasta 660
TECH Wired Mat MT 3.1		+		λ	0,040	0,047	0,057	0,067	-	0,094	0,134	0,173	0,200	-	-	A1	Manta	hasta 560
TECH Wired Mat MT 4.2		+		λ	0,041	0,047	-	0,065	-	0,090	0,124	0,167	0,217	-	-	A1	Manta	hasta 600
TECH Wired Mat MT 5.1		+		λ	0,039	0,045	0,052	0,061	-	0,081	0,106	0,137	-	0,175	0,195	A1	Manta	hasta 660
TECH Wired Mat MT 6.1		+		λ	0,040	0,045	0,051	0,058	-	0,076	0,098	0,124	-	0,156	0,174	A1	Manta	hasta 680

Para obtener el espesor mínimo de referencia  $d_{ref}$  se ha utilizado la **Tabla 11.34**. En la cual se presenta en función de la temperatura del fluido que circula por la tubería y del diámetro externo, el mínimo de aislante que se tendría que colocar.

**Tabla 11.34.** Aislante mínimo a colocar en las tuberías en función del diámetro externo y de la temperatura del fluido.

ISOVER TECH. Aislamiento Térmico. Espesores mínimos recomendados												
Tuberías		°C Temperatura del fluido <=										
Diámetro nominal		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	500
Di (")	Di (mm)	Espesor de aislamiento (mm)*										
1	34	40	50	60	80	100	120	120	140	160	200	200
1 1/2	48	50	60	80	80	100	120	140	160	180	200	220
2	60	50	60	80	100	100	120	140	160	190	210	220
2 1/2	73	60	80	100	100	110	130	140	170	190	210	230
3	89	60	80	100	110	110	130	150	180	200	220	240
4	114	80	80	110	110	120	140	160	180	210	240	250
6	168	80	80	110	120	130	150	170	190	230	260	280
8	219	80	100	120	130	130	160	180	200	240	270	290
10	273	100	100	120	130	140	170	190	210	250	290	310
12	324	100	100	120	130	140	170	200	220	260	300	320
14	356	120	120	130	140	140	180	200	230	260	300	320
16	407	120	120	130	140	150	180	200	230	270	310	330
18	457	120	120	130	140	150	180	210	240	280	320	340
20	508	120	120	130	140	150	190	210	240	280	320	350
22	559	120	130	140	150	150	190	220	250	290	330	350
24	609	130	140	140	150	150	190	220	250	290	330	360

■ TECH Pipe Section MT 4.0\*   
 ■ TECH Pipe Section MT 4.1\*   
 ■ TECH Pipe Section MT 4.1 + TECH Wired Mat MT 3.1 (2 o 3 capas)\*  
■ TECH Pipe Section MT 4.1 + TECH Wired Mat MT 4.2 (2 o 3 capas)\*   
 ■ TECH Wired Mat MT 4.2\*   
 ■ TECH Wired Mat MT 5.1\*  
■ TECH Wired Mat MT 6.1\*

\* Los espesores de aislamiento para los productos que se indican en la tabla están calculados para conseguir una Tª máxima superficial de 50 °C en cada caso (protección personal), para unas condiciones en exterior de Tamb de 20 °C, velocidad del viento de 0,5 m/s, una emisividad de la protección metálica de 0,13 y unas pérdidas máximas de 90 W/m², según el aislamiento clase 4 de acuerdo a la Norma EN 12828. En cualquier caso, se recomienda analizar cada proyecto de forma particular y calcular el espesor óptimo según la Norma UNE EN ISO 12241 y VDI 2055 teniendo en cuenta factores como coste de instalación, coste de la energía, periodos de amortización, etc.

Para cada tubería a aislar se sustituyen los valores obtenidos a partir de las tablas anteriores y es posible obtener el diámetro que deberá tener el aislante para mantener las tuberías a las condiciones de temperatura necesarias o para evitar accidentes debido a las altas o bajas temperaturas de los fluidos en algunas tuberías.

### 11.11.2.1 Ejemplo de cálculo de aislante de tuberías.

Para que sea más comprensible el procedimiento de determinación del aislante, se realizará el ejemplo de cálculo del aislante requerido para la tubería denominada **20"-M02-SS316L-203** del área 200, por la cual circula la corriente 7ª que se encuentra a 270°C, y se trata además de la corriente de entrada de reactivos al reactor R-100A, por lo que conservar la temperatura durante su circulación por la tubería será de suma importancia.

Para tuberías a menos de 300°C, como se ha indicado antes, se utilizará el material cuya conductividad térmica de referencia  $\lambda_{ref} = 0,038 (W/m * K)$ . El diámetro externo  $D$  de esta tubería ha sido definido como **508 mm**.

Con los valores que se cuenta, se busca primeramente en la **Tabla 11.34** el espesor mínimo de referencia  $d_{ref}$ . Para ello se sabe que la temperatura será de 270°C y el diámetro nominal es de 508 mm. Por lo tanto, se puede observar que  $d_{ref}=150mm$ .

Posteriormente, con ayuda de la **Tabla 11.33** se interpola entre los valores de conductividad para 250°C y 300°C y se obtiene el valor de la conductividad térmica del material aislante a la temperatura de la tubería. La conductividad a 270°C  $\approx 0,0774$  (W/m\*K).

Finalmente, se sustituye el valor obtenido para la conductividad térmica junto con los demás valores en la **Ecuación 11.278** para obtener el diámetro del aislante.

$$d = \frac{508,0}{2} \left[ \text{EXP} \left( \frac{0,0774}{0,0380} \cdot \ln \frac{508 + 2 \cdot 150}{508} \right) - 1 \right] = 399.66 \text{ mm}$$

## 11.12 Diseño de compresores y expansores

Para el diseño de los compresores y expansores necesarios para aumentar o disminuir la presión de las corrientes de gas del proceso, se ha utilizado el programa *Aspen HYSYS V10*, el cual da como resultados los valores observados en las **Tablas 11.35-11.41**, entre los cuales se incluye un valor aproximado de la potencia necesaria de los compresores en kW y de la potencia producida por los expansores (kW). Para el diseño en HYSYS se necesita definir las condiciones de temperatura, presión, caudal y composición de la corriente de entrada y posteriormente la presión que se quiere tener a la salida del compresor.

Para escoger los compresores en un catálogo de proveedores, se ha sobredimensionado la potencia obtenida en HYSYS un 15% con tal de evitar problemas por errores en los resultados obtenidos.

Los compresores pueden ser isotérmicos, pero para ello la compresión debe ser ideal y ocurrir muy lentamente para mantener constante la temperatura del gas. También pueden ser adiabáticos, pero para ello el proceso también debe ser ideal y en este caso ocurrir muy rápidamente sin ningún flujo de energía dentro o fuera del sistema. En la vida real, la mayoría de los procesos de expansión y compresión se encuentran en algún punto intermedio, o se dice que son **politrópicos**, [10].

HYSYS proporciona resultados para compresores y expansores adiabáticos y politrópicos, por lo tanto, se ha decidido considerar únicamente los resultados politrópicos.

Las tablas de resultados obtenidos para los compresores y los expansores son las siguientes:

**Tabla 11.35.** Resultados del diseño del compresor K-100.

Compresor K-100	
Polytropic head (m)	1901
Polytropic fluid head (kJ/kg)	18.64
Polytropic efficiency (%)	75.66
Power consumed (kW)	157.9
Polytropic head factor	1.0001
Polytropic exponent	1.423

**Tabla 11.36.** Resultados del diseño del compresor K-200.

Compresor K-200	
Polytropic head (m)	6922
Polytropic fluid head (kJ/kg)	67.88
Polytropic efficiency (%)	77.046
Power consumed (kW)	9057
Polytropic head factor	1.0002
Polytropic exponent	1.5024

**Tabla 11.37.** Resultados del diseño del compresor K-300.

Compresor K-300	
Polytropic head (m)	39999.18
Polytropic fluid head (kJ/kg)	392.3
Polytropic efficiency (%)	79.974
Power consumed (kW)	117.1
Polytropic head factor	1.0059
Polytropic exponent	1.3279

**Tabla 11.38.** Resultados del diseño del compresor K-400.

Compresor K-400	
Polytropic head (m)	1776
Polytropic fluid head (kJ/kg)	17.41
Polytropic efficiency (%)	75.584
Power consumed (kW)	107.2
Polytropic head factor	1.0002
Polytropic exponent	1.2616

**Tabla 11.39.** Resultados del diseño del compresor K-500.

Compresor K-500	
Polytropic head (m)	18331.841
Polytropic fluid head (kJ/kg)	179.8
Polytropic efficiency (%)	79.08
Power consumed (kW)	5927
Polytropic head factor	1
Polytropic exponent	1.4723

**Tabla 11.40.** Resultados del diseño del expansor EX300.

Expander EX-300	
Polytropic head (m)	8693
Potential fluid head (kJ/kg)	85.25
Polytropic efficiency (%)	72.862
Power produced (kW)	2.066
Fluid power (kW)	2.066
Polytropic head factor	1.001
Polytropic exponent	1.2075

**Tabla 11.41.** Resultados del diseño del expansor EX500.

Expander EX-500	
Polytropic head (m)	12262.52
Potential fluid head (kJ/kg)	120.3
Polytropic efficiency (%)	70.608
Power produced (kW)	2087
Fluid power (kW)	2087
Polytropic head factor	0.9814
Polytropic exponent	1.2358

### 11.13 Diseño de bombas

Para las bombas del proceso se deberá conocer la potencia teórica necesaria para aumentar la presión del fluido a la presión deseada. Para obtener dicha potencia se utilizará el concepto de carga de la bomba que proviene de realizar un balance de energía mecánica entre dos puntos estudiados, el punto desde el cual se quiere impulsar el fluido y el punto hasta el cual llegará. La potencia de la bomba será calculada de acuerdo con la **ecuación 11.279**:

$$\text{Ecuación 11. 279 } P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

Donde:

$P$  = potencia teórica de la bomba (W)

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$Q$  = caudal volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$h$  = carga total de la bomba (m)

El primer paso para calcular la potencia será realizar el cálculo de la carga total de la bomba. Para esto se utiliza la **Ecuación 11.280**:

$$\text{Ecuación 11.280 } h = (z_2 - z_1) + \frac{1}{g} \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{1}{2} \left( \frac{v_2^2}{\alpha} - \frac{v_1^2}{\alpha} \right) + e_v \right)$$

Donde:

$h$  = carga total de la bomba (m)

$P_i$  = presión en el punto  $i$  (Pa)

$z_i$  = altura en el punto  $i$  (m)

$v_i$  = velocidad de circulación del fluido en el punto  $i$  (m/s)

$\alpha$  = coeficiente de corrección de la energía cinética que vale 1 para circulación turbulenta y 0.5 para circulación laminar

$e_v$  = pérdida de carga por tramo recto y por accidentes ( $\text{m}^2/\text{s}^2 = \text{J/kg}$ )

Las presiones, alturas, gravedad y velocidades serán valores con los que ya se cuentan o han sido calculados previamente y dependerán de cada tubería estudiada. Para obtener el valor del coeficiente de corrección de la energía cinética será determinar el régimen de circulación del fluido por la tubería.

Para esto se calcula el número de Reynolds con la **Ecuación 11.281**:

$$\text{Ecuación 11.281 } Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Donde:

$\rho$  = densidad (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = viscosidad (kg/m\*s)

$v$  = velocidad de circulación del fluido (m/s)

Una vez calculado el Reynolds se sabe que:

Re < 2000: Régimen laminar.

2000 < Re < 4000: Zona crítica o de transición.

Re > 4000: Régimen turbulento.

Posteriormente, se calcula la pérdida de carga total  $e_v$  mediante la **Ecuación 11.282** que se aplicará dos veces, una para las pérdidas en el tramo de aspiración y otra para las pérdidas en el tramo de impulsión.

$$\text{Ecuación 11.282 } e_v = e_{v\text{tramo recto}} + e_{v\text{accidentes}}$$

Para los tramos rectos se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11.283 } e_{v\text{tramo recto}} = 4f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2}$$

Donde:

$L$  = longitud de la tubería

$D$  = Diámetro de la tubería

$v$  = velocidad del fluido (m/s)

$f$  = factor de fricción de Fanning

Para determinar el factor de fricción de Fanning se utilizará la **Figura 11.91** en la cual se puede encontrar el valor de  $4f$  en función del Reynolds que se ha calculado para la tubería y su rugosidad relativa.

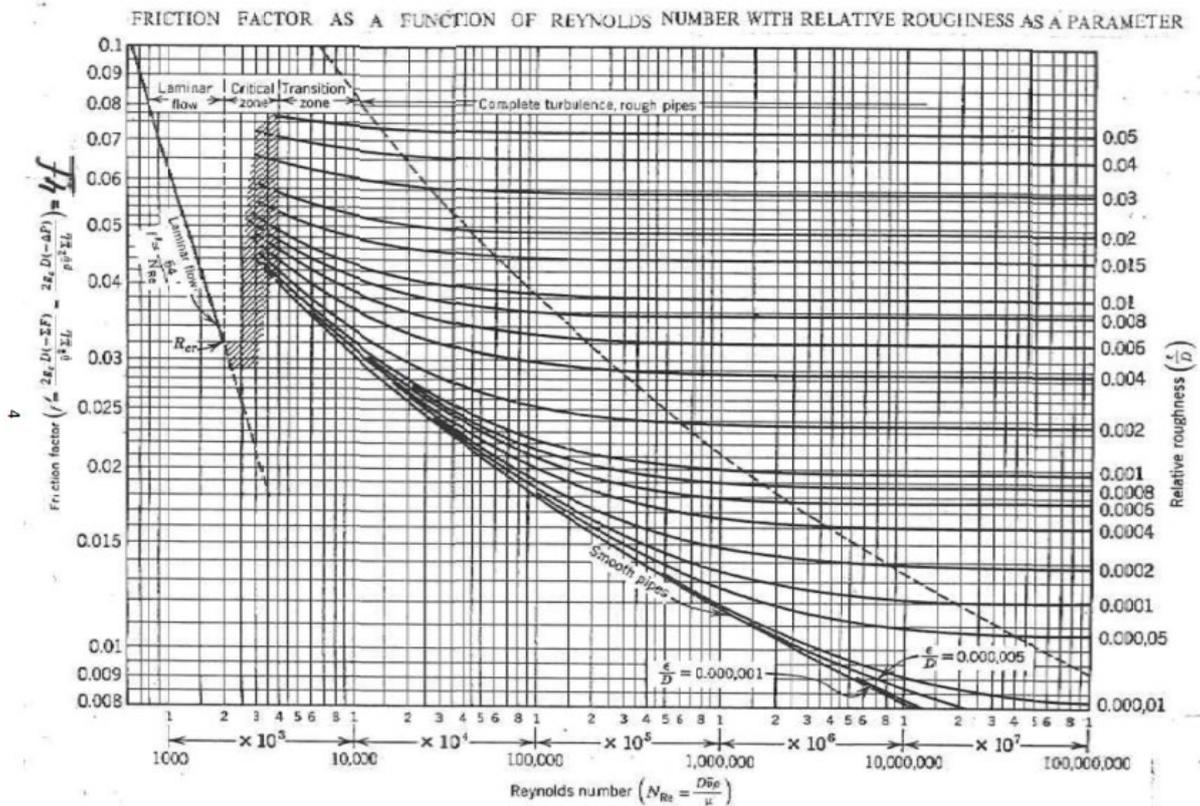


Figura 11.91. Representació gràfica del factor de Fanning en funció del valor del Reynolds.

La rugositat relativa se calcularà com la divisió entre la rugositat i el diàmetre de la tubería, tal com se mostra en la **Ecuación 11.284**:

$$\text{Ecuación 11.284 } \textit{rugositat relativa} = \frac{\varepsilon}{D}$$

$\varepsilon$  = rugositat (m)

D = diàmetre intern de la tubería (m)

La rugositat se obtindrà a partir de la següent taula.

**TAULA DE RUGOSITATS**

MATERIAL	RUGOSITAT $\varepsilon$ (m)	RUGOSITAT $\varepsilon$ (peus)
VIDRE O PLASTIC	Tub llis	Tub llis
Canonades de coure, llautó o plom	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Ferro de fundició sense revestiment	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Ferro de fundició revestit d'asfalt	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Acer comercial o acer soldat	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Ferro forjat	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Acer rematxat	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Ferro galvanitzat	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Formigó	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$

Como el material de las tuberías es acero inoxidable, se ha considerado la rugosidad igual a 4,6E-05.

Con los valores encontrados se procede a aplicar la **Ecuación 11.282** para el cálculo de las pérdidas para el tramo recto tanto para la aspiración como para la impulsión.

Seguidamente, se calcularán las pérdidas por accidentes como se muestra en la **Ecuación 11.285**:

$$\text{Ecuación 11.285 } e_{v_{\text{accidentes}}} = \sum K \cdot \frac{v^2}{2}$$

Donde:

$K$  = coeficiente que varía en función del accidente

$v$  = velocidad de circulación (m/s)

Para aplicar esta ecuación se definirán todos los accidentes del tramo a estudiar y se sumarán los coeficientes  $K$  de cada uno de ellos. Estos coeficientes se obtienen a partir de la **Figura 11.92**:

Taula adaptada de Perry, Manual del Ingeniero Químico

ACCIDENT	K	ACCIDENT	K
<b>Entrada/sortida circuit</b>		<b>Vàlvula de diafragma</b>	
Entrada encanonada	0,78	oberta	2,3
Entrada cantells vius	0,50	¾ oberta	2,6
Entrada arrodonida	0,04	½ oberta	4,3
Sortida encanonada	1,00	¼ oberta	21,0
Sortida cantells vius	1,00	<b>Vàlvula de seient</b>	
Sortida arrodonida	1,00	oberta	9,0
<b>Colzes/ Unions</b>		¾ oberta	13,0
Colze de 45° standard	0,35	½ oberta	36,0
Colze de 45° gran curvatura	0,20	¼ oberta	112,0
Colze de 90° standard	0,75	<b>Vàlvula angular oberta</b>	2,0
Colze de 90° gran curvatura	0,45	<b>Vàlvula de bola</b>	
Colze de 90° petita curvatura	1,3	oberta	0,05
Corba de 180°	1,5	20°	1,56
T standard ús com a colze	1,0	40°	17,3
T standard amb bifurcació tancada	0,4	60°	206,0
T standard amb divisió de cabal	1,0 (a)	<b>Vàlvula de papallona</b>	
Unió roscada	0,04	oberta	0,24
Maneguet d'unió	0,04	20°	1,54
<b>Vàlvula comporta</b>		40°	10,8
oberta	0,17	60°	118,0
¾ oberta	0,90	<b>Vàlvula de retenció (oberta)</b>	
½ oberta	4,5	de frontissa (columpio, charnera)	2,0
¼ oberta	24,0	de bola	70,0
<b>Cabalímetres mecànics</b>		de disc	10,0
de disc	7,0	<b>Canvi de diàmetre</b>	
de pistó	15,0	Estretament/	** (b)
rotatori	10,0	Eixamplament	** (b)
de turbina	6,0		

\*\*  $\left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2$  essent  $D_1$  el diàmetre del tub petit i  $D_2$  el diàmetre del tub gran.

Figura 11.92. Valores de K para los diferentes accidentes.

Una vez obtenidos los valores de pérdidas de cargas, y sustituyendo los demás valores encontrados, es posible calcular la carga total de la bomba con la **Ecuación 11.282**.

Obtenida la carga total, se procede a multiplicarla por el caudal volumétrico, la densidad y la gravedad para obtener la potencia teórica de la bomba como indica la **Ecuación 11.286**. La potencia que se obtiene se dividirá entre el rendimiento de la bomba, que ha sido supuesto como un 75%.

$$\text{Ecuación 11.286 Potencia} = \frac{P}{0.75}$$

Se procede a buscar con proveedores, bombas que cumplan con el requerimiento de potencia, carga total y que sean capaces de mover el caudal volumétrico con el que se cuenta.

### 11.13.1 Ejemplo de diseño de bombas

Se realiza ahora un ejemplo de cálculo para comprender de mejor manera el procedimiento de determinación de las bombas. Se determinará la potencia de la bomba P-301 que impulsa los fondos de la columna C-300 al tanque flash T-300.

Primeramente, se determinan la altura y la presión del tramo de aspiración y del tramo de impulsión. Siendo  $P_1$ = presión del tramo de aspiración,  $P_2$ = presión del tramo de impulsión.  $z_1$ =altura del tramo de aspiración y  $z_2$ = altura del tramo de impulsión.

La corriente de aspiración de la bomba será la corriente número 11 y la de impulsión la numero 12, como se puede observar en el balance de materia (**Capítulo 1**), estas tienen unas presiones de 1.300.000Pa y 35.000.000Pa respectivamente. Por lo tanto,  $P_1=1.300.000\text{Pa}$  y  $P_2=35.000.000\text{Pa}$ . Las alturas consistirán en aproximaciones, ya que no se cuentan con las medidas exactas de las tuberías en la planta. Por lo tanto, se ha considerado  $z_1=0\text{m}$  en el tramo de aspiración y  $z_2=15\text{m}$  para el tramo de impulsión.

Se observa posteriormente en el listado de tuberías (**Capítulo 4**) que la velocidad del tramo de aspiración, es decir la velocidad de la corriente **11**, será de 0.819 m/s y la velocidad del tramo de impulsión, corriente **12**, es de 2.185 m/s. El diámetro interno de la tubería de aspiración será igual a 0.4953 m y el de la tubería de impulsión es de 0.3032 m (**listado de tuberías, Capítulo 4**). Se define también la viscosidad del fluido como  $6.96\text{E}-04 \text{ kg/m}^*\text{s}$  y su densidad como  $995\text{kg/m}^3$ .

Con los parámetros y valores que se tiene es posible calcular el número de Reynolds tanto para el tramo de aspiración como para el de impulsión.

$$Re, \text{ aspiracion} = \frac{995 \cdot 0.819 \cdot 0.4953}{6.96\text{E} - 04} = 5.80\text{E} + 05$$

$$Re, \text{ impulsión} = \frac{995 \cdot 2.185 \cdot 0.3032}{6.96\text{E} - 04} = 9.51\text{E} + 05$$

Como se puede observar, ambos circularán en régimen turbulento y por lo tanto  $\alpha = 1$

Se calculan ahora las pérdidas de tramo recto para ambos tramos, aspiración e impulsión. Para ello se calcula primeramente la rugosidad relativa para cada tramo con la rugosidad del acero inoxidable y con los diámetros internos como se muestra en la **Ecuación 11.284**, resultando en una rugosidad relativa igual a 0.0001 en el tramo de aspiración y 0.00015 en el tramo de impulsión.

Con estos valores y los Reynolds obtenidos se busca en el gráfico de la **Figura 11.91** el valor de  $4f$ :

$$4f \text{ aspiración} = 0.0142$$

$$4f \text{ impulsión} = 0.0143$$

Posteriormente, se sustituye el valor de  $4f$  en la **ecuación 11.281** al igual que la velocidad, el diámetro y la longitud de la tubería (obtenidas de las aproximaciones de longitudes presentes en el listado de tuberías del **Capítulo 4**) y se calculan las pérdidas por tramo recto para el tramo de aspiración y de impulsión.

$$e_{v\text{tramo recto, a aspiración}} = 0.0142 \cdot \frac{5}{0.4953} \cdot \frac{0.8191^2}{2} = 0.048 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$e_{v\text{tramo recto, impulsión}} = 0.0143 \cdot \frac{13}{0.3032} \cdot \frac{2.1850^2}{2} = 1.464 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$e_{v\text{tramo recto, total}} = e_{v\text{tramo recto, a aspiración}} + e_{v\text{tramo recto, impulsión}}$$

$$e_{v\text{tramo recto, total}} = 1.511 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Se procede a calcular las pérdidas por accidentes con la **Ecuación 11.285**. Se determina  $\sum K$  para el tramo de aspiración e impulsión sumando las  $K$ 's de todos los accidentes para cada tramo, el resultado se encuentra en las siguientes tablas.

**Tabla 11.42.** Sumatorio de coeficientes  $K$  para los accidentes del tramo de aspiración.

Accidentes tramo de aspiración	K
T's estándar con bifurcación cerrada x 10	4
Válvula en Y x 1	3
Codo de 90° x 4	3
Válvula de compuerta x 1	0.17
Válvula de retención x 1	10
<b>Suma de K</b>	<b>20.17</b>

**Tabla 11.43** Sumatorio de coeficientes  $K$  para los accidentes del tramo de impulsión.

Accidentes tramo de impulsión	K
T's estándar con bifurcación cerrada x 9	3.6
Codo de 90° x 6	4.5
Válvula de compuerta x 1	0.17
Válvula de retención x 2	20
<b>Suma de K</b>	<b>28.27</b>

Con las sumas totales de K obtenidas y las velocidades de los tramos, se calcula para cada tramo las pérdidas por accidentes.

$$e_{v\text{accidentes, aspiración}} = 20.17 \cdot \frac{0.8191^2}{2} = 6.76 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$e_{v\text{accidentes, impulsión}} = 28.78 \cdot \frac{2.1850^2}{2} = 67.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$e_{v\text{accidentes, total}} = e_{v\text{accidentes, a spiración}} + e_{v\text{accidentes, impulsión}}$$

$$e_{v\text{accidentes, total}} = 74.26 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Para calcular las pérdidas totales se suman las pérdidas por accidentes y las pérdidas por tramos rectos, obteniéndose:

$$e_{v,\text{totales}} = e_{v\text{accidentes, total}} + e_{v\text{tramo recto, total}} = 75.76 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Se sustituyen todos los valores en la **Ecuación 11.280** para obtener la carga total de la bomba.

$$h = (15 - 0) + \frac{1}{9.81} \left( \frac{35 \cdot 10^{+06} - 1.3 \cdot 10^{+06}}{995} + \frac{1}{2} \left( \frac{2.1850^2}{1} - \frac{0.8191^2}{1} \right) + 75.76 \right)$$

$$h = 248.31 \text{ m}$$

El caudal volumétrico de la corriente a mover es de 0.158 m<sup>3</sup>/s. Se calcula la potencia con la **Ecuación 11.279**, sustituyendo valores y la carga obtenida.

$$P = 995 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 9.81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot 0.158 \text{ (m}^3/\text{s)} \cdot 248.31 \text{ m} = 382337.37 \text{ W} = 382.34 \text{ kW}$$

Finalmente, aplicando el rendimiento de la bomba:

$$\text{Potencia teórica necesaria} = \frac{382.34}{0.75} = 509.8 \text{ kW}$$

Esta será la potencia que se procede a buscar en la bomba que se adquirirá con los proveedores, junto con la carga y el caudal volumétrico a mover.

### 11.13.2 Cálculo de NPSH de las bombas

Adicionalmente a comprobar que las bombas cumplan con la potencia requerida y con la carga total, se han calculado las NPSH disponibles y requeridos de cada bomba, con el fin de comprobar que ninguna de estas tendría problemas por cavitación.

Para el cálculo de la NPSH disponible se utiliza la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuación 11. 287 } NPSH_{disp} = \Delta z + \frac{1}{g} \cdot \left[ \left( \frac{P_1 - P_v}{\rho} \right) + \frac{v_1}{2 \cdot \alpha} - ev \right]$$

Donde:

$\Delta z$  = diferencia de altura (m)

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$P_v$  = presión de vapor del fluido que circula por la bomba a su temperatura de circulación (Pa)

$P_1$  = presión en el punto estudiado número 1 (Pa)

$v_1$  = velocidad en el punto estudiado número 1 (m/s)

$ev$  = pérdidas de carga ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

Debido a que la diferencia de altura no es conocida con exactitud, se ha supuesto un valor de 15m para todas las bombas, basado en las alturas promedio de los equipos con los que se cuenta en ETHOXID y hacia los que los fluidos tendrán que ser impulsados.

Para conocer el valor de la presión de vapor de las mezclas de fluidos a la temperatura requerida, se ha utilizado el programa ASPEN HYSYS, para esto se crea una corriente con la composición requerida, se define la temperatura de trabajo y se define la fracción de vapor igual a 0. HYSYS calculará la presión de vapor a la temperatura indicada.

Sustituyendo el valor de la presión de vapor, la presión y velocidad del punto uno, densidad del fluido, gravedad y pérdidas de carga (que se calculan conforme al apartado anterior) se sustituyen en la **Ecuación 11.287** y se calcula la  $NPSH_{disponible}$ .

Para calcular la NPSH requerido se sigue la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuación 11.288 } NPSH_{requerido} = ha - \frac{P_v}{\rho \cdot g}$$

Donde:

$ha$  = carga de aspiración de la bomba (m)

Como se puede observar en la **Ecuación 11.288**, será necesario calcular la carga de aspiración de la bomba  $ha$ , para esto se utiliza la **Ecuación 11.289**.

$$\text{Ecuación 11.289 } ha = (z_1 - z_3) + \left(\frac{1}{g}\right) \cdot \left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2 \cdot \alpha} - e_{v_{asp}}\right)$$

Una vez obtenido el valor de la carga de aspiración, se sustituirá este junto a los demás valores requeridos en la **Ecuación 11. 288** y se obtendrá el valor de  $NPSH_{requerido}$ , este valor tendrá que ser menor que el  $NPSH_{disp}$  obtenido para que la bomba esté funcionando correctamente.

Los valores de carga de aspiración ( $ha$ ),  $NPSH_{requerido}$  y  $NPSH_{disponible}$  obtenidos para todas las bombas diseñadas se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 11.44.** Valores de carga de aspiración ( $ha$ ) y los  $NPSH$  disponible y requeridos.

	$ha$ (m)	$NPSH_{disp}$	$NPSH_{req}$
<b>P-100</b>	214,8	196.4	187.8
<b>P-101</b>	457.9	460.2	457.8
<b>P-102</b>	488.6	497.6	488.5
<b>P-103</b>	488.6	497.6	488.5
<b>P-300</b>	23.50	32.58	23.16
<b>P-301</b>	132.6	8.446	0.467
<b>P-302</b>	9.519	15.31	9.194
<b>P-400</b>	17.43	7.910	0.322
<b>P-401</b>	23.14	6.817	1.677
<b>P-500</b>	9.929	4.357	3.583
<b>P-501</b>	372.7	380.4	372.0
<b>P-600</b>	58.83	55.28	44.05

A pesar de que algunas bombas se encuentran cerca del límite de  $NPSH$  requerido, como se puede observar en la **Tabla 11.44**, todas las bombas tienen un  $NPSH_{req}$  menor que el disponible y por lo tanto se cumplirá con el límite mínimo para evitar la cavitación, siempre y cuando el proceso se encuentre funcionando de manera correcta.

## 11.14 Bibliografía

- [1] Allow Wire International. *Propiedades físicas del acero 316L*. Última consulta: 06/04/2020. Obtenido de: <https://www.alloywire.es/products/stainless-steel-316/>
- [2] ATECYR: Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, “**Guía técnica de diseño de centrales de calor eficientes**”, última consulta: 18/05/2020; [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11\\_Guia\\_tecnica\\_de\\_diseño\\_de\\_centrales\\_de\\_calor\\_eficientes\\_e53f312e.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11_Guia_tecnica_de_diseño_de_centrales_de_calor_eficientes_e53f312e.pdf)
- [3] A. W. Kanagawua, T. T. Kanagawua, N. M. Kanagawua; “**Method for producing ethylene oxide patent**”, US 9,518,036 B2; última consulta: 10/04/2020; <https://patentimages.storage.googleapis.com/db/61/a9/9518d824e9be23/US9518036.pdf>
- [4] Bosch: Innovación para tu vida, distribuidor de calderas de vapor, última consulta: 18/05/2020; <https://www.bosch-thermotechnology.com/es/es/ocs/comercial-e-industrial/caldera-de-vapor-universal-zfr-zfr-x-669475-p/>
- [5] CIS TÜV Thüringen Group, Allowable stress values S of typical stainless steels, última consulta: 05/06/2020; <https://www.cis-inspector.com/asme-code-calculation-allowable-stresses-high-alloy.html>
- [6] Custom Chill: Innovate cooling solutions, distribuidor de Chillers, última consulta: 18/05/2020; <http://www.customchill.com/cral700/>
- [7] De Pretto Industrie, distribuidor de turbinas de vapor, última consulta: 18/05/2020; <https://www.deprettoindustrie.it/turbine-a-vapore>
- [8] Donald Peckner and I. M. Bernstein, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, (1977). **Handbook of Stainless Steels**.
- [9] EWK: torres de refrigeración, distribuidor de torres de refrigeración, última consulta: 18/05/2020; <https://www.ewk.eu/index.php/producto/es/ewb>
- [10] FacStaff, Fluid Transportation, última consulta: 05/06/2020; <http://facstaff.cbu.edu/rprice/lectures/compress.html>
- [11] Hierros y Transformados S.A, “**Ficha técnica: lana de roca**”, última consulta: 16/04/2020; [https://www.metalpanel.com/wp-content/uploads/2018/02/lana\\_roca.pdf](https://www.metalpanel.com/wp-content/uploads/2018/02/lana_roca.pdf)
- [12] ISOVER Saint-Gobain, “**Tuberías de proceso - las soluciones de ISOVER para el aislamiento industrial de tuberías**”; última consulta: 05/06/2020; <https://www.isover-aislamiento-tecnico.es/industria/aplicaciones/tuberias>

- [13] J. Massa, J. Giro y A. Giudici, “**Código ASME para el diseño de calderas y recipientes a presión**”, última consulta: 05/04/2020; [http://www.cat.calc\\_est\\_2\\_im.efn.uncor.edu/wp-content/uploads/2013/10/Cap-16\\_RECIPIENTES\\_Parte-1.pdf](http://www.cat.calc_est_2_im.efn.uncor.edu/wp-content/uploads/2013/10/Cap-16_RECIPIENTES_Parte-1.pdf)
- [14] König+Co: Forming Know-How, empresa distribuidora de cabezales cónicos; última consulta: 10/04/2020; <https://www.koenigco.de/de/produkte/behaelterboeden/kloepferboden/>
- [15] K.R. westerterp; K.J. Ptasinski. Chemical reaction engineering laboratories, Department of chemical engineering, Twente University of Technology, 7500 AE Enschede, The Netherlands. “**SAFE DESIGN OF COOLED TUBULAR REACTORS EXOTHERMIC, MULTIPLE REACTIONS; PARALLEL REACTIONS. The design and operation of an ethylene oxide reactor.**”
- [16] LANL, “**Engineering standards manual PD342 Section D20-B31.3-G, ASME B31.3 Process Piping Guide**”, última consulta: 05/06/2020; [https://engstandards.lanl.gov/esm/pressure\\_safety/process\\_piping\\_guide\\_R2.pdf](https://engstandards.lanl.gov/esm/pressure_safety/process_piping_guide_R2.pdf)
- [17] OCTALSTEEL, Steel Pipe Dimensions Chart ANSI B36.10 & 36.19, última consulta: 05/06/2020; <https://www.octalsteel.com/wp-content/uploads/2018/01/steel-pipe-dimensions-chart-ansi-b36.10-36.19.pdf>
- [18] Philip D. Harvey, editor, American Society for Metals, Metals Park, OH, (1982). **Engineering Properties of Steels.**
- [19] Pump Fundamentals, “**Help for calculating maximum allowable piping pressure according to the ASME pressure piping code B31.3**”, última consulta: 05/06/2020; <https://www.pumpfundamentals.com/help15.html>
- [20] Sicea Ingeniería, “**Guía del código ASME sección VIII división I tomo I**”; última consulta: 05/04/2020; <https://es.slideshare.net/siceaingenieria/guia-del-codigo-asme-seccion-viii-division-1-tomo-1>
- [21] Siemens, distribuidor de transformadores de potencia eléctricos, última consulta: 25/05/2020; <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/high-voltage/transformers/power-transformers.html>
- [22] Siemens, distribuidor de generadores de electricidad, última consulta: 25/05/2020; <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/generators/sngen-100a.html>
- [23] SSE Pipefittings LTD, Piping Components, última consulta: 05/06/2020; <https://www.ssepipelinefittings.co.uk/images/SSE%20brochure.pdf>

---

[24] The American Society of Mechanical Engineers Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990. 2004 Edition July 1, 2004. **2004 ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE AN INTERNATIONAL CODE.**

[25] VYC Industrial, distribuidor de calderas de agua sobrecalentada, última consulta: 30/05/2020; <https://vycindustrial.com/calderas/agua-sobrecalentada/>

[26] Zeeshan Nawaz SABIC Technology & Innovation, Saudi Basic Industries Corporation (SABIC), Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia. **“Heterogeneous Reactor Modeling of an Industrial Multitubular Packed-Bed Ethylene Oxide Reactor”**