

Grado en Ingeniería Química

Trabajo de Fin de Grado

PLANTA PARA LA FABRICACIÓN DE ÓXIDO DE ETILENO

Mokhles Barrouhou El Khomsi 1334879

Roger Font Oriol 1427604

Josselyn Karina Ruiz Rodriguez 1426188

Gerard Ruiz Rosillo 1432681

Oriol Sanchez Beumala 1457198

Marina Torrico Viñoles 1455863

Tutora: María Eugenia Suárez-Ojeda

Grupo 5



Manual de cálculos

Volumen 11



Índice

11.1.	Reactor R201	5
11.1.1.	Diseño reactor en HYSYS	5
11.1.2.	Método KERN	8
11.1.3.	Diseño mecánico	20
11.2.	Columna de Absorción W301.....	28
11.2.1.	Diseño funcional.....	29
11.2.2.	Dimensionado	30
11.2.3.	Partes internas	31
11.2.4.	Diseño mecánico	32
11.3.	Columna de Absorción W302.....	38
11.3.1.	Diseño funcional.....	39
11.3.2.	Dimensionado	40
11.3.3.	Partes internas	41
11.3.4.	Diseño mecánico	42
11.4.	Columna de Destilación D501	48
11.4.1.	Diseño funcional.....	49
11.4.2.	Método Riguroso.....	49
11.4.3.	Dimensionado	51
11.4.4.	Diseño mecánico	52
11.5.	Columna de Destilación D502	59



11.5.1. Diseño funcional.....	59
11.5.2. Método Riguroso.....	59
11.5.3. Dimensionado	61
11.5.4. Diseño mecánico	62
11.6. Separador S401	68
11.6.1. Diseño mecánico	72
11.7. Intercambiadores de calor	79
11.7.1. Diseño de los intercambiadores.....	79
11.8. Tanques de almacenamiento de óxido de etileno T-601/T-602	82
11.8.1. Dimensionamiento	83
11.8.2. Diseño mecánico	84
11.8.3. Diseño del aislamiento	91
11.8.4. Diseño de los cubetos de retención	93
11.9. Diseño de bombas.....	94
11.9.1. Régimen del fluido	95
11.9.2. Pérdidas de carga por fricción.....	97
11.9.3. Potencia real.....	99
11.9.4. Ejemplo de cálculo	99
11.10. Diseño de compresores.....	103
11.11. Diseño de equipos de servicio.....	104
11.11.1. Chiller	104



11.11.2.	Caldera	106
11.11.3.	Aire comprimido.....	108
11.11.4.	Nitrógeno	108
11.12.	Seguridad.....	111
11.12.1.	Cálculo de incendio	111
11.12.2.	Cálculo de explosiones	114
11.13.	Medio ambiente.....	120
	Emisiones atmosféricas.....	120
	Vertidos acuosos	121
11.14.	Evaluación económica.....	122
11.14.1.	Costes de equipos	122
11.14.1.1.	Reactores.....	122
11.14.1.2.	Absorbedores	123
11.14.1.3.	Separadores.....	125
11.14.1.4.	Destiladores.....	125
11.14.1.5.	Tanques de almacenamiento	126
11.14.1.6.	Intercambiadores de calor	126
11.14.1.7.	Compresores y Bombas.....	127
11.14.1.8.	Chiller	128
11.14.1.9.	Turbina	128
11.14.2.	Amortización	129



11.15. Bibliografía 131



11.1. Reactor R201

La función del reactor R201 es producir el producto final que se desea, es decir, el óxido de etileno. El óxido de etileno se produce a partir del etileno (C_2H_4) y oxígeno (O_2) puro. El óxido de etileno se obtiene a partir de la oxidación parcial del etileno. Se produce también de manera simultánea la combustión completa del etileno obteniendo, como productos de combustión, dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O).

El reactor se diseñará como un reactor multitubular de carcasa y tubos, debido a su funcionalidad y características.

Estas reacciones son muy exotérmicas. Por ese motivo, se diseñará el reactor a partir del programa de simulación Aspen Hysys V10, como un reactor multitubular. Pero como deberá ser un reactor con un intercambio de calor muy grande, se diseñará a partir del método KERN como deberá ser la refrigeración del reactor. Por lo tanto, se deberán hacer de forma paralela los dos diseños, el del reactor en Hysys y el de la refrigeración con el método KERN.

11.1.1. Diseño reactor en HYSYS

El diseño del reactor en HYSYS proporcionara los parámetros característicos del reactor para posteriormente poder calcular a partir del KERN las dimensiones y caudales de refrigeración.

Para poder simular el reactor primero se debe definir el paquete de fluidos y la cinética, para llevar a cabo esta reacción se ha usado el paquete de fluidos UNIFAC, y para la cinética, tal y como se observa en la (Figura 11.1.1), se han usado las constantes del artículo "A KINETIC MODEL OF STEADY STATE ETHYLENE EPOXIDATION OVER A SUPPORTED SILVER CATALYST".



Stoichiometry Reaction Rate

Numerator

Forward Reaction

A	9.4710e+03
E	33836
B	<empty>

Reverse Reaction

A'	<empty>
E'	<empty>
B'	<empty>

Components	Forward Order	Reverse Order
Ethylene	1.000	<empty>
Oxygen	1.000	<empty>
C2Oxide	0.0000	<empty>
<empty>		

Denominator

Component Exponents

A	E [kJ/kgmole]	Ethylene	Oxygen
4.5070e-004	30870	0.00000	
5.1330e-003	33041	1.0000	
<empty>	<empty>	<empty>	

Denominator Exponent: 1

Delete Row

Figura 11.1.1-a. Muestra la cinética para la reacción de oxidación en HYSYS

Stoichiometry Reaction Rate

Numerator

Forward Reaction

A	1.5771e+06
E	56731
B	<empty>

Reverse Reaction

A'	<empty>
E'	<empty>
B'	<empty>

Components	Forward Order	Reverse Order
Ethylene	1.000	<empty>
Oxygen	1.000	<empty>
CO2	0.0000	<empty>
H2O	0.0000	<empty>
<empty>		

Denominator

Component Exponents

A	E [kJ/kgmole]	Ethylene	Oxygen
4.5070e-004	30870	0.00000	
5.1330e-003	33041	1.0000	
<empty>	<empty>	<empty>	

Denominator Exponent: 1

Delete Row

Figura 11.1.1-b. Muestra la cinética para la reacción de combustión en HYSYS

Una vez definida la cinética y el paquete de fluidos, se simula el reactor y el absorbedor para poder tener en cuenta la recirculación y se definen las temperaturas y presiones de entrada y salida del reactor para su correcto funcionamiento.

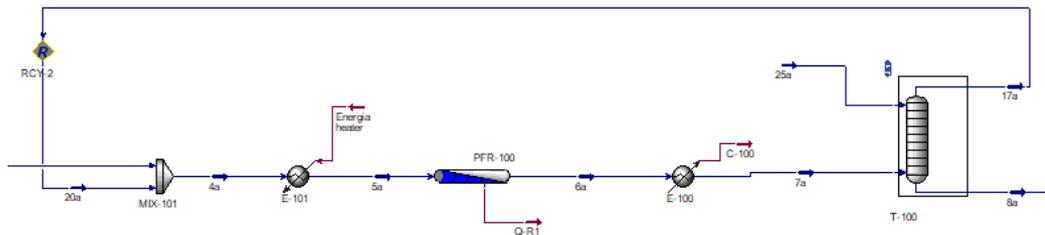


Figura 11.1.2. Circuito de reactor y absorbedor en HYSYS

Para acabar el diseño, se iteran los caudales de entrada de oxígeno y etileno para poder encontrar el volumen final, los caudales y composiciones a la entrada de este y cumplir con el 10% de conversión del etileno para la reacción de oxidación; consiguiendo así todos los parámetros necesarios para la correcta simulación del reactor. Estas iteraciones se han hecho a partir de un cálculo anterior aproximado de un balance de materia, y alrededor de estos valores, se ha iterado en la simulación hasta conseguir los parámetros que se deseaba obtener.

Design	Reactions	Rating	Worksheet	Performance	Dynamics
Rating					
Sizing					
Nozzles					
Tube Dimensions					
Total Volume	11.69 m ³				
Length	8.700 m				
Diameter	4.094e-002 m				
Number of Tubes	1021				
Wall Thickness	3.680e-003 m				
Tube Packing					
Void Fraction	0.500				
Void Volume	5.847 m ³				

Figura 11.1.3. Dimensiones de los tubos del reactor.



Design	Reactions	Rating	Worksheet	Performance	Dynamics
Worksheet		Name	5a	6a	Q-R1
Conditions	Vapour	1.0000	1.0000	<empty>	
Properties	Temperature [C]	270.0	270.0	<empty>	
Composition	Pressure [kPa]	2000	1850	<empty>	
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	6110	6003	<empty>	
	Mass Flow [kg/h]	2.200e+005	2.200e+005	<empty>	
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	375.1	366.6	<empty>	
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1.571e+005	-1.718e+005	<empty>	
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	182.8	180.0	<empty>	
	Heat Flow [kJ/h]	-9.596e+008	-1.031e+009	7.177e+007	

Figura 11.1.4. Muestra los valores de entrada y salida del reactor

A partir de estos valores se realizará el método KERN intentando que el diseño para un correcto intercambio de calor coincida con el diseño realizado en el simulador para conseguir el funcionamiento adecuado del reactor.

11.1.2. Método KERN

El método KERN es un método para diseño de intercambiadores de calor de carcasa y tubos basado en el intercambio de calor en función de la variación de temperatura y el caudal de calor. Para diseñarlo se ha seguido el “*Disseny de bescanviadors de calor de carcasa i tubs, MÈTODE KERN*” de Francesc Valero y Trinitat Suau, del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Barcelona. Dicho documento especifica paso por paso como diseñar un intercambiador de carcasa y tubos. Seguidamente se explica el procedimiento:

Definir las propiedades y tipo de circulación:

En primer lugar, se define que fluido circula por carcasa y cual por tubos, además de sus características y condiciones de circulación. En este caso no se ha tenido que escoger, ya que, al tratarse de un reactor, el fluido de dentro de los tubos será la mezcla reactiva y el de carcasa será el fluido refrigerante, en este caso, agua. Los datos escogidos se pueden observar en la siguiente tabla.



Tabla 11.1.1 Propiedades de las corrientes de entrada y salida del reactor

Propiedades	Carcasa (AGUA) - (S)		Tubos (MEZCLA REACTIVA)- (t)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Fase	L	G	G	G
Temperatura °C	20	190	270	270
Presión (kPa)	101.32	101.32	2000	1850
Caudal másico (kg/h)	43056	43056	220000	220000
Densidad (kg/m ³)	998	6.388	14.17	13.29
Viscosidad (kg/ms)	0.001002	0.0001537	0.00002203	0.00002071
Cp (J/kg°C)	4182	2710	1714	1716
Conductividad térmica (W/m°C)	0.598	0.0382	0.04743	0.04537

Una vez definidas las propiedades, se realiza el balance térmico para saber el caudal de calor que se desprenderá. En este caso, como el caudal de calor ya se ha obtenido a partir del diseño del reactor a partir del Hysys, lo que se busca con el balance térmico es el valor del caudal de agua necesario para intercambiar dicho calor. El balance térmico se expresa:

$$Q_Q = M_S * C_{PS} * (T_2 - T_1) = m_t * C_{pt} * (T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 11.1.1}$$

Donde:

- Subíndice s= carcasa
- Subíndice t= tubos
- M,m=caudal másico (kg/s)
- C_p= capacidad calorífica (J/kg°C)
- Q_Q= calor intercambiado (W)

El siguiente paso sería el cálculo de DTML, es decir, la variación logarítmica de la temperatura. En este caso el valor obtenido es 149.2, ya que el reactor se intentará que sea totalmente isoterma.

$$DTML = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Ecuación 11.1.2}$$

Donde:

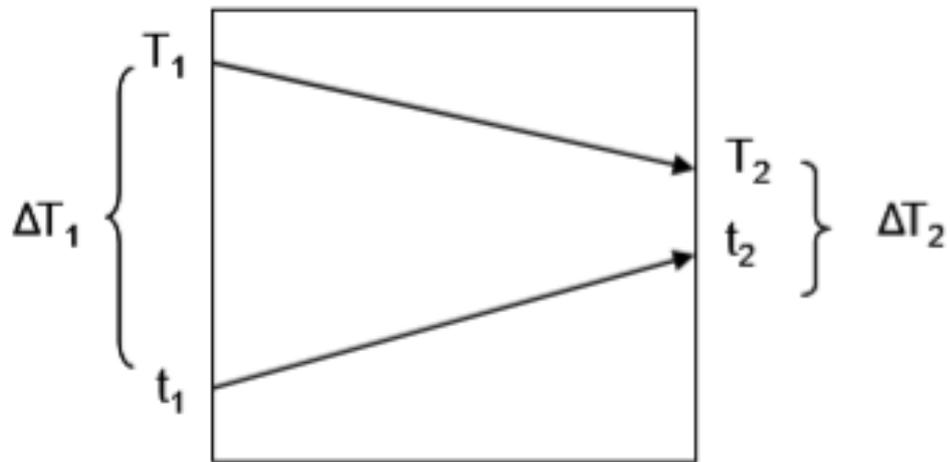


Figura 11.1.5 Valores para el cálculo de DTML

Lo siguiente sería, decidir el tipo de circulación, que será en paralelo ya que en este reactor la mayor temperatura se desprenderá al principio.

Además, se puede decidir el número de pasos por carcasa y tubos. Debido a que, como ya se ha dicho, se trata de un reactor, solamente tendrá un paso por carcasa y tubos. Por este motivo, el siguiente paso se puede obviar, que es el paso donde se corrige la DTML, y se irá directamente a la selección del intercambiador.

Selección del intercambiador

En primer lugar, se supone un coeficiente global inicial (U) a partir de los fluidos que circulan. Estos datos se pueden suponer a partir de los datos que proporcionan las siguientes figuras:

Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	U (W/m ² °C)
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800-1500
Organic solvents	Organic solvents	100-300
Light oils	Light oils	100-400
Heavy oils	Heavy oils	50-300
Gases	Gases	10-50
<i>Coolers</i>		
Organic solvents	Water	250-750
Light oils	Water	350-900
Heavy oils	Water	60-300
Gases	Water	20-300
Organic solvents	Brine	150-500
Water	Brine	600-1200
Gases	Brine	15-250
<i>Heaters</i>		
Steam	Water	1500-4000
Steam	Organic solvents	500-1000
Steam	Light oils	300-900
Steam	Heavy oils	60-450
Steam	Gases	30-300
Dowtherm	Heavy oils	50-300
Dowtherm	Gases	20-200
Flue gases	Steam	30-100
Flue	Hydrocarbon vapours	30-100
<i>Condensers</i>		
Aqueous vapours	Water	1000-1500
Organic vapours	Water	700-1000
Organics (some non-condensibles)	Water	500-700
Vacuum condensers	Water	200-500
<i>Vaporisers</i>		
Steam	Aqueous solutions	1000-1500
Steam	Light organics	900-1200
Steam	Heavy organics	600-900

Figura 11.1.6 Coeficientes globales U

Fluid	Coefficient (W/m ² °C)
River water	3000-12,000
Sea water	1000-3000
Cooling water (towers)	3000-6000
Towns water (soft)	3000-5000
Towns water (hard)	1000-2000
Steam condensate	1500-5000
Steam (oil free)	4000-10,000
Steam (oil traces)	2000-5000
Refrigerated brine	3000-5000
Air and industrial gases	5000-10,000
Flue gases	2000-5000
Organic vapours	5000
Organic liquids	5000
Light hydrocarbons	5000
Heavy hydrocarbons	2000
Boiling organics	2500
Condensing organics	5000
Heat transfer fluids	5000
Aqueous salt solutions	3000-5000

Figura 11.1.7 Coeficientes globales U



En este caso, después de varias pruebas, se ha acabado suponiendo un valor de $176 \text{ W/m}^2\text{C}$, ya que si nos fijamos en la (Figura 11.1.7) el rango de valores posibles sería de 20 a 300 ya que los fluidos son Gas-Agua. A partir de este valor, ahora se puede calcular el área total de intercambio:

$$A = \frac{Q_Q}{U \cdot DTML}$$

Ecuación 11.1.3

Dicha área de intercambio total da 1294.81 m^2 .

En este momento, debemos definir las características de los tubos y la carcasa. Para ello se debe seleccionar la longitud (L), el diámetro interno (D_i), el diámetro externo (D_e) y el espesor (Δx). Estos valores haremos que coincidan con los valores de la simulación del reactor en Hysys. Además, se deberá escoger la distribución de los tubos, es decir, como será el pitch y su valor, que se calculará multiplicando el diámetro externo por 1.25. Se ha escogido un pitch triangular ya que su velocidad de transferencia de calor es mayor, aunque su pérdida de carga también, pero como tratamos con agua descalcificada y gases, no afectará mucho.

En este caso los valores han sido:

- $L = 8.70 \text{ m}$
- $D_i = 0.04094 \text{ m}$
- $D_e = 0.0483 \text{ m}$
- $\Delta x = 0.00368 \text{ m}$
- Pitch triangular = 0.0604 m

Una vez se tienen estos valores, se puede calcular el área de intercambio de un tubo y, por lo tanto, a partir del área total, se saca el número de tubos, consiguiendo así 1021 tubos.



Una vez ya se tienen diseñados los tubos, se diseñará la carcasa. Lo primero a diseñar es su diámetro. Para calcular dicho diámetro se debe sumar al diámetro (D_b), que es el espacio que debe existir entre los tubos y la pared dependiendo el tipo de carcasa. Se ha escogido un tipo de carcasa T, a partir del cual, con el valor de D_b y el pitch se encuentra el valor del diámetro de carcasa D_s .

$$D_b = D_E * \left(\frac{N_t}{K_1}\right)^{1/n_1} \quad \text{Ecuación 11.1.4}$$

Donde:

- N_t = número de tubos
- D_b = diámetro del conjunto de los tubos
- D_e = diámetro externo de los tubos
- n_1 y K_1 van en función del pitch, y se escogen en la siguiente tabla.

Tabla 11.1.2 valores de n_1 y K_1 en función del pitch

<i>Pitch triangular $p_t = 1.25 D_E$</i>					
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
<i>Pitch quadrat $p_t = 1.25 D_E$</i>					
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

Usando unos valores de $K_1=0.319$ y $n_1= 2.14$, se consigue un valor de D_b de 2.047. Con ese valor, el tipo de carcasa escogido y la (Figura 11.1.8) se encuentra el valor del diámetro de carcasa, que corresponde a 2.1456 m.

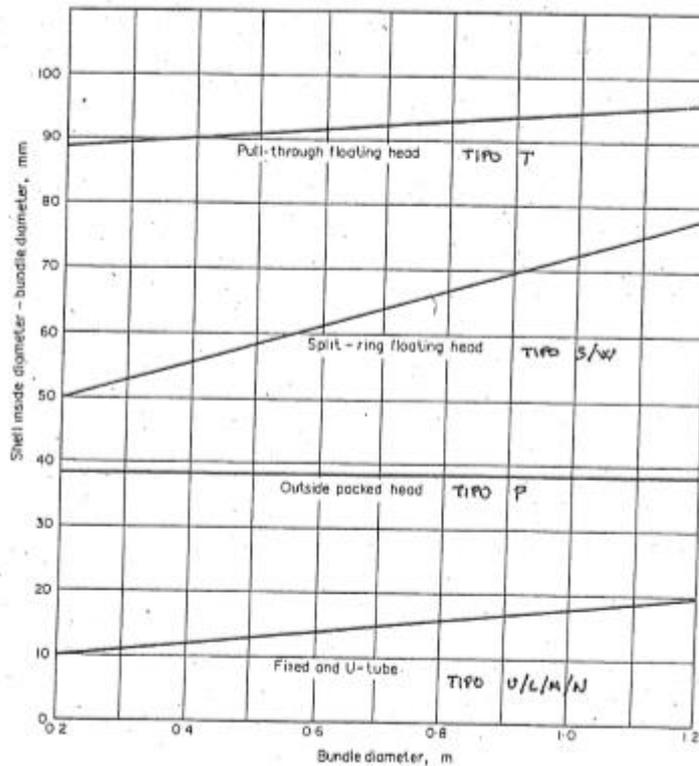


Figura 11.1.8 Gráfico para encontrar el valor del diámetro de carcasa a partir del tipo de carcasa

Antes de continuar, se debe comprobar que lo que se ha realizado hasta ahora está dentro de los rangos. Dicha comprobación se realiza dividiendo L entre D_s . Si este valor da entre 4 y 6 se considera que es correcto y se pasa al punto siguiente. En este caso el valor da 4.08, por lo tanto, aunque justo, está dentro de los rangos y podemos seguir.

Cálculo velocidades típicas por tubos y numero de pasos por tubos

Se puede calcular la velocidad de paso por tubos a partir de:

$$v_t = \frac{m_t}{\rho_t \cdot A_{pas1tub} \cdot N_{tp}}$$

Ecuación 11.1.5

Donde:

- m_t = caudal másico del fluido por tubos
- ρ_t = densidad fluido tubos



- A_{pas1tubo} = área de paso del fluido por un solo tubo
- N_{pt} = número de tubos por paso

Calculando dicha velocidad da 3.47 m/s, en teoría es errónea y se debería volver a empezar, ya que para gases a alta presión el rango esta entre 5 y 10 m/s. Aun así, se considera como correcta ya que como en el reactor dentro de los tubos tenemos un lecho catalizado, la velocidad será distinta a la que se calcule con el KERN siempre. Por lo tanto, se puede seguir.

Determinación de pantallas deflectoras y separación entre ellas

Hay dos parámetros que determinan las características geométricas de las pantallas deflectoras, la altura libre de la pantalla (baffle cut) i el espacio entre pantallas (l_b). El primer valor oscila entre el 15 y el 45%, escogiendo el 25%. El segundo valor oscila entre 0.2 y 1, escogiendo 1 en este caso. A partir de estos valores, se calcula el número de pantallas deflectoras como:

$$\text{Pantallas} = \left(\frac{L}{l_b} \right) - 1 \quad \text{Ecuación 11.1.6}$$

Los valores obtenidos en este apartado afectaran a la velocidad de circulación del fluido por la carcasa, como se verá más adelante. En este caso el número de pantallas deflectoras es 3.08.

Corrección del valor de la U del intercambiador

Debido a que el área de intercambio se puede haber visto modificada a causa de los redondeos del número de tubos necesarios, se debe recalcular el valor del área y, por lo tanto, de U. En este caso, como no ha variado el área, no ha variado el valor de U y sigue siendo 176 W/m²°C.

Como no ha habido variación en la U, se comprobará que este valor sea correcto a partir del cálculo del mismo, pero a partir de los coeficientes individuales y los factores de suciedad.



Determinación de U_r a partir del cálculo de coeficientes individuales y factores de suciedad

A partir de los valores ya calculados, se podrán encontrar otros parámetros que ayudarán en el cálculo de los coeficientes individuales. A partir de dichos coeficientes se podrá calcular de nuevo el valor de U , y si da que la nueva U , llamada U_r , es mayor que la U supuesta inicialmente dentro de un rango del 15%, se dará por correcto y finalizado el diseño del intercambiador, ya que se habrán obtenido todos los valores necesarios.

En primer lugar, se calcula el coeficiente individual de transmisión de calor del lado del tubo h_t . Para ello, se calcula el área de paso de todos los tubos con un mismo paso A_{past} .

$$A_{pas1tub} = \frac{\pi}{4} * D_i^2 \quad \text{Ecuación 11.1.7}$$

$$A_{past} = \frac{A_{pas1tub}}{n_{pt}} * N_t \quad \text{Ecuación 11.1.8}$$

Entonces, se supone que el diámetro equivalente es igual al diámetro interno de los tubos. Y, por lo tanto, se puede calcular el caudal másico por unidad de área, para usarlo en el posterior cálculo del número de Reynolds.

$$G_{tub} = \frac{m_t}{A_{past}} \quad \text{Ecuación 11.1.9}$$

$$Re_t = \frac{D_i * G_{tub}}{\mu} \quad \text{Ecuación 11.1.10}$$

$$Pr_t = \frac{c_p * \mu}{k} \quad \text{Ecuación 11.1.11}$$

Substituyendo los valores en estas fórmulas, se consiguen unos valores de:

- $A_{pas1tub} = 0.001316 \text{ m}^2$
- $A_{past} = 1.284 \text{ m}^2$
- $G_{tub} = 48 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $Re_t = 91216$
- $Pr_t = 0.79$



Una vez se tienen todos los valores, se puede calcular el coeficiente individual de calor en el lado del tubo (h_t).

$$\frac{h_t * D_i}{k} = j_h * Re_t * Pr_t^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{Ecuación 11.1.12}$$

$$\text{Para } Re > 10000 \quad j_h = 0.0027 * Re_t^{-0.2}$$

Se deberá calcular primeramente el valor de h_t menospreciando el valor de la variación de la viscosidad, que es la misma (Ecuación 11.1.12) pero sin tener en cuenta la viscosidad. Ese valor nos da 263.01 W/m²°C. Una vez se ha obtenido este valor, se busca bibliográficamente el valor de la viscosidad a la temperatura de la pared. Y a partir de todos los parámetros se calcula el coeficiente individual de transmisión de calor del lado del tubo h_t . Este valor acaba dando 269 W/m²°C, el cual está dentro de los rangos que queda establecido por el tipo de compuesto que circula por dentro de los tubos, que son gases, rango del cual es 15 < h_t < 300.

En segundo lugar, se calcula el coeficiente individual de transmisión de calor del lado de la carcasa h_s . Para ello, se calcula el área transversal de la carcasa A_{st} .

$$A_{st} = \frac{l_b * D_s * (pitch - D_e)}{pitch * n_{ps}} \quad \text{Ecuación 11.1.13}$$

Entonces, se puede calcular el caudal másico por unidad de área, la velocidad típica y el diámetro equivalente, para usarlo en el posterior cálculo del número de Reynolds. En este caso, la velocidad típica pasará igual que en el caso de la velocidad típica por tubos, se considera como correcta ya que como no estamos diseñando un intercambiador básico, sino un reactor la velocidad será distinta a la que se calcule con el KERN siempre.

$$G_s = \frac{M_s}{A_{st}} \quad \text{Ecuación 11.1.14}$$

$$v_s = \frac{M_s}{A_{st} * \rho_s} \quad \text{Ecuación 11.1.15}$$

$$D_{eq} = \frac{1.10}{D_e} * (pitch^2 - 0.917 * D_e^2) \quad \text{Ecuación 11.1.16}$$

$$Re_s = \frac{D_{eq} * G_s}{\mu} \quad \text{Ecuación 11.1.17}$$

$$Pr_s = \frac{C_p * \mu}{k} \quad \text{Ecuación 11.1.18}$$

Substituyendo los valores en estas fórmulas, se consiguen unos valores de:

- $A_{st} = 0.9207 \text{ m}^2$
- $G_s = 12.99 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $v_s = 0.0259 \text{ m/s}$
- $D_{eq} = 0.0343 \text{ m}$
- $Re_s = 771$
- $Pr_s = 6.26$

Una vez se tienen todos los valores, se puede calcular el coeficiente individual de calor en el lado del tubo (h_s).

$$\frac{h_s * D_{eq}}{k} = j_h * Re_s * Pr_s^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{Ecuación 11.1.19}$$

En este caso el valor de j_h se calcula a partir del valor del *buffle cut* i del número de Reynolds, mirándolo en la siguiente figura:

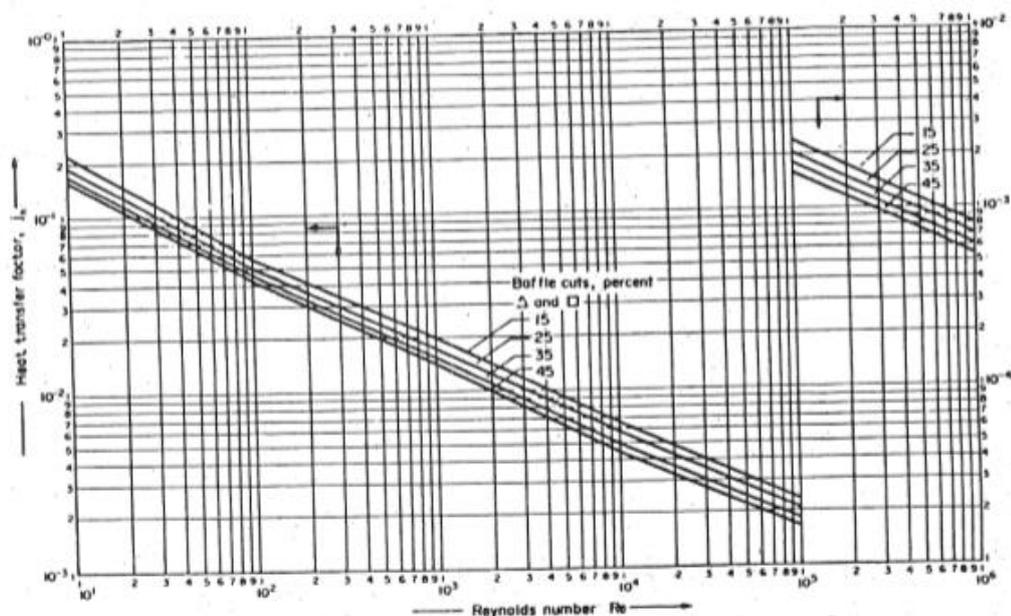


Figura 11.1.9. Gráfico para encontrar el valor de j_h



Se deberá calcular primeramente el valor de h_s menospreciando el valor de la variación de la viscosidad, que es la misma (**Ecuación 11.1.19**) pero sin tener en cuenta la viscosidad. Ese valor nos da $2620 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Una vez se ha obtenido este valor, se busca bibliográficamente el valor de la viscosidad a la temperatura de la pared. Y a partir de todos los parámetros se calcula el coeficiente individual de transmisión de calor del lado del tubo h_s . Este valor acaba dando $3317 \text{ W/m}^2\text{°C}$, el cual está dentro de los rangos que queda establecido por el tipo de compuesto que circula por dentro de la carcasa, que es agua, rango del cual es $2000 < h_s < 12000$.

Por último, habiendo calculado los coeficientes individuales de transmisión de calor y buscando bibliográficamente los valores del factor de suciedad, se consigue saber el valor de U_r , que se comparará con el valor de U inicial para saber si el diseño del intercambiador es correcto.

$$\frac{1}{U_R} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_r} + \frac{D_e * \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 * k} + \frac{D_e}{D_i} * \frac{1}{R_t} + \frac{D_e}{D_i} * \frac{1}{h_t}$$

Ecuación 11.1.20

Donde:

- $h_s = 3317 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $h_r = 3000 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $k = 16.3 \text{ W/mK}$
- $R_t = 5000 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $h_t = 269 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Con estos valores se consigue un valor de U_r de $181.84 \text{ W/m}^2\text{°C}$, que es mayor que U pero sin pasarse el 15%, es decir, el intervalo correcto de U_r sería $176 < U_r < 202$, y vemos que, efectivamente, está dentro el rango.

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño del intercambiador es correcto. En este caso faltaría calcular las pérdidas de presión, pero debido a que, como ya se ha dicho, no estamos diseñando un intercambiador normal, sino el intercambiador de calor del reactor como refrigeración, este cálculo de



pérdidas de presión no es necesario. Además, este valor de pérdidas de presión nos lo proporcionará la simulación hecha con HYSYS.

11.1.3. Diseño mecánico

Utilizando el código ASME sección VIII división 1, se han realizado el diseño mecánico de todos los equipos a presión del proceso. El material escogido para la construcción del reactor es el acero inoxidable austenítico, ya que el uso de acero inoxidable es el recomendado para los procesos con óxido de etileno y, en concreto, el uso de AISI 316L será el más óptimo en equipos que además trabajan a altas temperaturas.

Presión de diseño

$$P_{diseño} = 1.1 \cdot P_{operación}$$

Ecuación 11.1.21

Temperatura de diseño

$$T_{diseño} = T_{operación} + 20$$

Ecuación 11.1.22

Espesor del cuerpo cilíndrico

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C1$$

Ecuación 11.1.23

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- P: Presión de diseño (psi)
- R: Radio interior del reactor (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura



- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Factor de soldadura E

Dado que la unión entre placas presenta una cierta discontinuidad y además su realización puede comportar defectos, la zona donde se realiza la soldadura se puede ver debilitada, por tanto, el código ASME introduce una reducción del límite elástico haciendo el producto de este por el factor de soldadura E.

Para este caso se ha considerado que el radiografiado es total, es decir, que el valor de E será de 1.

Factor S

El factor de estrés “S” se obtiene de la siguiente tabla representada en la (Figura 11.2.6) a partir de la temperatura de diseño calculada.

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	12,8	12,4	12,1	—	—

Figura 11.1.10. Tensión máxima admisible en función de la temperatura

Como se puede observar en la (Figura 11.1.10), para este caso se obtiene un factor de estrés de 15.7, multiplicado por 1000 para obtener psi, ya que nuestro material es el acero inoxidable de grado 316L y las condiciones de operación se encuentran en el rango de 100 a 300 °F.

El factor de tolerancia a la corrosión sirve para añadirle un espesor que proteja los equipos a lo largo de su vida útil. Normalmente se encuentra entre 1 y 6 mm, siendo de 3 mm el escogido para el reactor.



Ejemplo de cálculo:

$$t = \frac{319 \cdot 43.11}{15700 \cdot 1 - 0.6 \cdot 319} + 0.12 = 1.01 \text{ mm}$$

Tabla 11.1.3. Muestra los datos y el resultado del espesor del cuerpo

P (psi)	319
R (inch)	43.11
S (psi)	15700
E	1
C1 (inch)	0.12
t (inch)	1.01
t (mm)	30

Se obtiene un espesor de 25 mm, se decide sobredimensionar a 30 mm por motivos de seguridad.

Una vez conocido el espesor se procede a calcular el diámetro externo del reactor:

$$D_{ext,reactor} = D_{int,reactor} + 2 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.1.24}$$

Ejemplo de cálculo:

$$D_{ext,reactor} = 2.19 + 2 \cdot 0.03 = 2.25 \text{ m}$$

Espesor del cabezal y el fondo toriesférico

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C1 + C2 \quad \text{Ecuación 11.1.25}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- M: relación entre la longitud y el radio interno del reactor
- P: Radio interior del reactor (inch)
- L: Longitud total del reactor (inch)

- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)
- C2: Tolerancia de fabricación

Para obtener la relación entre la longitud y el radio interno “M” se ha usado la siguiente tabla:

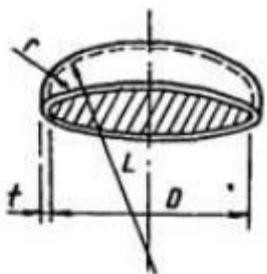
E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16^{2/3}$															
	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1r}$															
	When L/r less than $16^{2/3}$																
	$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$															
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.1.11 Muestra la relación entre la longitud y el radio interno “M”

Donde:

- L: Diámetro interno del cilindro (mm)
- r: Diámetro interno del cilindro · 0.085 (mm)

En este caso la relación entre L/r tiene un valor de 11.8, entonces para esta relación se mira en la (Figura 11.1.11) y se obtiene un valor de M de 1.61.

Para los fondos toriesféricos, suelen aparecer perdidas de espesor en las partes curvas. Para evitar esto, se ha añadido un factor igual al 10% del espesor del cuerpo.

Ejemplo cálculo:

$$t = \frac{1.61 \cdot 319 \cdot 79.8}{2 \cdot 15700 \cdot 1 - 0.2 \cdot 319} + 0.12 + 0.12 = 1.55 \text{ inch}$$

Tabla 11.1.4. Muestra los datos usados para el cálculo del espesor de las tapas.

P (psi)	319
L (inch)	79.8
M	1.61
S (psi)	15700
E	1
C1 (inch)	0.12
C2 (inch)	0.12
t (inch)	1.55
t (mm)	39.3

Se obtiene un espesor del cabezal y de los fondos de $t = 39.3 \text{ mm}$, se sobredimensiona a $t = 47.2 \text{ mm}$ por motivos de seguridad.

Altura del reactor

Para saber la altura total del reactor, se ha de saber también la longitud del cabezal y su fondo con su respectivo espesor. Se utilizan las siguientes relaciones:

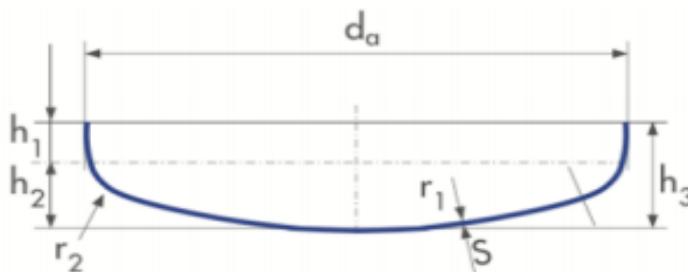


Figura 11.1.12 Muestra geometría de los cabezales y fondos



$$h1 = 3.5 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.1.26}$$

$$h2 = 0.1935 \cdot da - 0.455 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.1.27}$$

$$h3 = h1 + h2 + t \quad \text{Ecuación 11.1.28}$$

Ejemplo de cálculo:

$$h1 = 3.5 \cdot 47.2 = 165.2 \text{ mm}$$

$$h2 = 0.1935 \cdot 2251 - 0.455 \cdot 47.2 = 414 \text{ mm}$$

$$h3 = h1 + h2 = 165.2 + 414 + t = 627 \text{ mm}$$

Por motivos de seguridad se le suma el espesor del cabezal a la altura “h3”.

Entonces para acabar de calcular la altura del reactor:

$$H_{reactor} = (2 \cdot 0.63) + 8.7 = 9.95 \text{ m}$$

Volumen del reactor

El cálculo del volumen de las diferentes partes del reactor se usará para poder calcular su peso. Utilizando las ecuaciones siguientes obtenemos:

$$V_{tubos} = N_t \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{ext,tubos}^2 \cdot L \quad \text{Ecuación 11.1.29}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int,reactor}^2 \cdot L \quad \text{Ecuación 11.1.30}$$

$$V_{coraza} = V_{cilindro} - V_{tubos} \quad \text{Ecuación 11.1.31}$$

$$V_{tapas} = 0.0809 \cdot D_{int,reactor}^3 \quad \text{Ecuación 11.1.32}$$

Donde:

- V_{tubos} : Volumen exterior de los tubos



- $V_{cilindro}$: Volumen del cuerpo del reactor
- V_{coraza} : Volumen del interior de la coraza
- V_{tapas} : Volumen de las tapas toriesféricas
- N_t : Número de tubos
- $D_{ext, tubos}$: Diámetro exterior de los tubos
- D_{int} : Diámetro interior del reactor
- L : Longitud de los tubos

Ejemplo de cálculo:

$$V_{tubos} = 1021 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.048^2 \cdot 8.7 = 16.1 \text{ m}^3$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot 2.19^2 \cdot 8.7 = 32.8 \text{ m}^3$$

$$V_{coraza} = 32.8 - 16.1 = 16.7 \text{ m}^3$$

$$V_{tapas} = 0.0809 \cdot 2.19^3 = 0.8 \text{ m}^3$$

Peso del reactor

Para este cálculo se debe calcular primero el peso del reactor vacío y el peso del reactor cuando está operando.

Primero se calcula la masa del cuerpo, que se obtiene a partir de las dimensiones del reactor, de su espesor, del peso de los tubos, del catalizador y de la densidad del material que lo forma:

$$M_{reactor} = M_{cilindro} + 2M_{tapas} + M_{tubos} + M_{catalizador} \quad \text{Ecuación 11.1.33}$$

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot H_{cuerpo} \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.1.34}$$

$$M_{tapas} = 0.08089 \cdot (D_{ext}^3 - D_{int}^3) \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.1.35}$$

$$M_{tubos} = N_t \cdot L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext,tubos}^2 - D_{int,tubos}^2) \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.1.36}$$

$$M_{catalizador} = V_{reactor} \cdot \rho_{catalizador} \quad \text{Ecuación 11.1.37}$$

Donde:

- $M_{reactor}$: Peso total del reactor vacío
- $M_{cilindro}$: Peso del cilindro
- M_{tapas} : Peso de las tapas



- M_{tubos} : Peso de los tubos
- $M_{\text{catalizador}}$: Peso total del catalizador
- D_{int} : Diámetro interior del reactor
- D_{ext} : Diámetro exterior del reactor
- N_t : Número de tubos
- $D_{\text{ext, tubos}}$: Diámetro exterior de los tubos
- $D_{\text{int, tubos}}$: Diámetro interior del reactor
- L : Longitud de los tubos
- V_{reactor} : Volumen interior de los tubos
- P_{material} : densidad del material de construcción
- $\rho_{\text{catalizador}}$: densidad del catalizador

Ejemplo de cálculo:

$$M_{\text{cilindro}} = \frac{\pi}{4} \cdot (2.25^2 - 2.19^2) \cdot 8.7 \cdot 8000 = 14562 \text{ kg}$$

$$M_{\text{tapas}} = 0.08089 \cdot (2.25^3 - 2.19^3) \cdot 8000 = 574 \text{ kg}$$

$$M_{\text{tubos}} = 1021 \cdot 8.7 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.048^2 - 0.041^2) \cdot 8000 = 34771 \text{ kg}$$

$$M_{\text{catalizador}} = 11.7 \cdot 700 = 8190 \text{ kg}$$

$$M_{\text{reactor}} = 14562 + 574 + 34771 + 8190 = 58097 \text{ kg}$$

Para el cálculo del reactor lleno:

$$M_{\text{mezcla}} = V_{\text{int, tubos}} \cdot \rho_{\text{mezcla}}$$

Ecuación 11.1.38

$$M_{\text{agua}} = (V_{\text{coraza}} + 2 \cdot V_{\text{tapas}}) \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Ecuación 11.1.39

$$M_{\text{reactor, lleno}} = M_{\text{reactor}} + M_{\text{mezcla}} + M_{\text{agua}}$$

Ecuación 11.1.40

Donde

- M_{mezcla} : Peso del fluido en el interior de los tubos
- M_{agua} : Peso del fluido en el interior de la coraza
- $M_{\text{reactor, lleno}}$: Peso del reactor lleno
- $V_{\text{int, tubos}}$: Volumen interior de los tubos
- V_{coraza} : Volumen del interior de la coraza
- V_{tapas} : Volumen de las tapas toriesféricas
- P_{mezcla} : densidad de la mezcla
- P_{agua} : densidad del agua



Ejemplo de cálculo:

$$M_{mezcla} = 11.7 \cdot 15.66 = 183 \text{ kg}$$

$$M_{agua} = (16.7 + 2 \cdot 0.8) \cdot 999 = 18282 \text{ kg}$$

$$M_{reactor,lleno} = 58097 + 183 + 18282 = 76562 \text{ kg}$$

Aislamiento

Para el cálculo del aislamiento se ha utilizado el programa Insulan de la empresa CALORCOL.S.A. Dónde introduciendo los datos del material del recipiente, del material del aislante (lana de roca), la temperatura interior, 270°C, la temperatura ambiente, 25°C, y la de la superficie, que será como máximo 40°C, el programa calcula el espesor óptimo de aislante, que para este equipo será de 165mm.

11.2. Columna de Absorción W301

La función de la columna de absorción W301 es absorber todo el óxido de etileno que se encuentra en fase gas, en agua que circulara en contracorriente dentro de la columna, de manera que se obtenga una corriente líquida formada por agua y óxido de etileno mayoritariamente.

Se ha iterado el caudal de agua necesario para absorber todo el óxido de etileno generado en el reactor, ya que para separar el óxido de etileno del agua se puede conseguir relativamente fácil mediante un destilador debido a sus diferentes puntos de ebullición.

Por último, se ha optado para que la temperatura de entrada del sistema sea de 25°C, de esta manera, se consigue la absorción total del óxido de etileno en el agua, y que la corriente de salida de la absorción sea en fase líquida.



11.2.1. Diseño funcional

Para diseñar esta columna de absorción se ha utilizado el programa de simulación Aspen Hysys V10, ya que este nos facilitará toda la información necesaria para dimensionar la columna.

Para poder simular la columna, primero se fijan las variables ya definidas previamente, como la presión de entrada, la temperatura de operación y las corrientes de entrada, después el simulador Aspen Hysys V10, mediante iteraciones proporciona el resto de los parámetros, como el número de etapas, las temperaturas de salida, la presión de salida, etc.

Las siguientes tablas muestran las propiedades de las corrientes de entrada y salida de la columna de absorción W301.

Tabla 11.2.1 Propiedades de las corrientes de entrada y salida de la columna de absorción W301

	ENTRADA	
	Superior	Inferior
Caudal volumétrico (m ³ /h)	361	366.6
Caudal másico (kg/h)	360300	220000
Temperatura (°C)	25	25
Presión (kpa)	2000	2000
	SALIDA	
	Superior	Inferior
Caudal volumétrico (m ³ /h)	348	379.7
Caudal másico (kg/h)	203800	376500
Temperatura (°C)	45.87	28.94
Presión (kpa)	2000	2000

Como se puede observar en la (Tabla 11.2.1), se cumple el balance de materia:

$$E - S = 0$$

Ecuación 11.2.1

Cálculo del balance de materia

$$360300 + 220000 - 203800 - 376500 = 0$$

Tabla 11.2.2 Fracciones másicas de las corrientes de entrada y salida.

	Entrada		Salida	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Etileno	0	0.331	0.357	0.000
Oxígeno	0	0.008	0.009	0.000
Óxido de etileno	0	0.043	0.000	0.025
Dióxido de carbono	0	0.612	0.634	0.014
Agua	1	0.007	0.001	0.961

11.2.2. Dimensionado

Para poder dimensionar el equipo en el simulador de Aspen Hysy, se le debe proporcionar el tipo de columna que se desea, es decir, si se quiere diseñar una columna de platos o de empaque.

Para esta columna se ha decidido realizar con platos, ya que si fuera de empaque tendría un coste muy elevado a causa del diámetro y la altura. Por lo tanto, en el simulador se ha seleccionado la opción de “Tray sizing” y se ha diseñado con platos de orificios (Sieve). A continuación, se muestra la (Tabla 11.2.3) que proporciona los datos del dimensionado sobre la columna:

Tabla 11.2.3. Resultados del dimensionado de la columna W301

Etapas de equilibrio	10
Diámetro (m)	2.7
Altura de la columna (m)	13.5
Máxima inundación (%)	75.85
Presión de diseño (kpa)	2200
ΔP total (kpa)	15.61

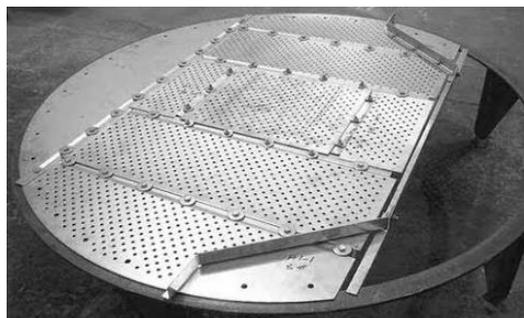


Figura 11.2.1. Muestra un plato sieve.

11.2.3. Partes internas

Distribuidores del líquido

Se sitúa en la parte superior de la columna. Cuando el líquido entra en contracorriente, el distribuidor lo reparte de forma uniforme por la capa superior del relleno para mejorar el intercambio. La empresa Koch-Glitsch se encargará de proporcionar el distribuidor.



Figura 11.2.2 Distribuidor de líquido .

Soporte del empaque

Colocado en la parte inferior de la columna, está diseñado para aguantar el peso restante del empaque y también para evitar una inundación elevada. Se escoge el soporte de la empresa Sulzer.



Figura 11.2.3 Muestra el soporte de la columna de absorción



11.2.4. Diseño mecánico

Para el diseño mecánico se ha tenido en cuenta las altas temperaturas y presiones a las que trabaja el equipo, por eso los cálculos han sido realizados mediante el código ASME. El material usado para el equipo es el acero inoxidable AISI 316L ya que en esta columna se trabaja con óxido de etileno.

Presión de diseño

$$P_{diseño} = 1,1 \cdot P_{operación} \quad \text{Ecuación 11.2.2}$$

Temperatura de diseño

$$T_{diseño} = T_{operación} + 20 \quad \text{Ecuación 11.2.3}$$

Espesor del cuerpo cilíndrico

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.2.4}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- P: Presión de diseño (psi)
- R: Radio interior de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Factor de soldadura E

Dado que la unión entre placas presenta una cierta discontinuidad y además su realización puede comportar defectos, la zona donde se realiza la soldadura se



puede ver debilitada, por tanto, en código ASME introduce una reducción del límite elástico haciendo el producto de este por el factor de soldadura E.

Para este caso se ha considerado que el radiografiado es parcial, es decir, que el valor de E será de 0.85.

Factor S

El factor de estrés “S” se obtiene de la siguiente tabla representada en la (Figura 11.2.4) a partir de la temperatura de diseño calculada.

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	—	—

Figura 11.2.4. Tensión máxima admisible en función de la temperatura

Como se puede observar en la (Figura 11.2.4), para este caso se obtiene un factor de estrés de 15.7 ya que nuestro material es el acero inoxidable de grado 316L y las condiciones de operación se encuentran en el rango de 100 a 300 °F.

Ejemplo de cálculo:

$$t = \frac{320 \cdot 53.11}{15700 \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 320} + 0.078 = 1.37 \text{ inch}$$

Tabla 11.2.4. Muestra los datos y el resultado del espesor del cuerpo

P (psi)	320
R (inch)	53.11
S (psi)	15700
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	1.37
t (mm)	35



Como se observa en la (**Tabla 11.2.4**), se obtiene un espesor de 35 mm, se decide sobredimensionar a 38 mm por motivos de seguridad.

Una vez conocido el espesor se procede a calcular el diámetro externo de la columna:

$$D_{ext,columna} = D_{int,columna} + 2 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.2.5}$$

Ejemplo de cálculo:

$$D_{ext,columna} = 2.7 + 2 \cdot 0.038$$

Espesor del cabezal y el fondo toriesférico

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.2.6}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- M: relación entre la longitud y el radio interno de la columna
- P: Radio interior de la columna (inch)
- L: Longitud total de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Para obtener la relación entre la longitud y el radio interno, factor “M”, se ha usado la siguiente tabla que se muestra en la (**Figura 11.2.5**)

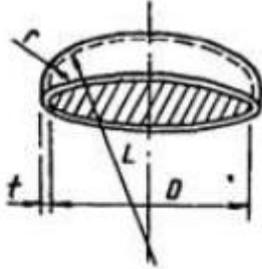
E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16^{2/3}$															
	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$															
	When L/r less than $16^{2/3}$																
	$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$															
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.2.5. Muestra la relación entre la longitud y el radio interno "M"

Dónde:

- L: Diámetro interno del cilindro (mm)
- r: Diámetro interno del cilindro · 0.1 (mm)

En este caso la relación entre L/r tiene un valor de 10, entonces para esta relación se mira en la (Figura 11.2.5) y se obtiene un valor de M de 1.54.

Ejemplo cálculo:

$$t = \frac{1.54 \cdot 320 \cdot 106.3}{2 \cdot 15700 \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 320} + 0.078 = 2.045 \text{ inch}$$

Tabla 11.2.5. Muestra los datos usados para el cálculo del espesor de las tapas.

P (psi)	320
L (inch)	106.3
M	1.54
S (psi)	15700
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	2.045
t (mm)	50.8

Tal y como se observa en la (Tabla 11.2.5), se obtiene un espesor del cabezal y de los fondos de $t=50.8$ mm, se sobredimensiona a $t = 55.8$ mm por motivos de seguridad.

Altura de la columna

Para saber la altura total de la columna, se ha de saber también la longitud del cabezal y su fondo con su respectivo espesor. Se utilizan las siguientes relaciones:

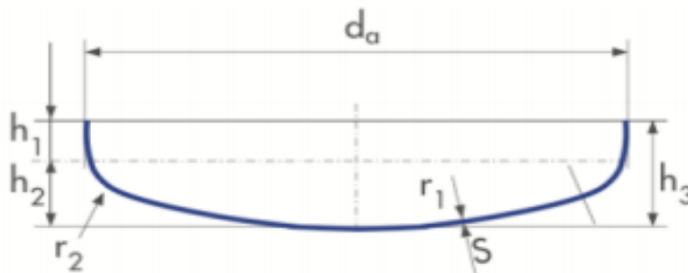


Figura 11.2.6 Muestra geometría de los cabezales y fondos

$$h_1 = 3.5 \cdot t$$

$$h_2 = 0.1935 \cdot D_a - 0.455 \cdot t$$

$$h_3 = h_1 + h_2$$

Ejemplo de cálculo:

$$h_1 = 3.5 \cdot 0.05588 = 0.1955$$



$$h2 = 0.1935 \cdot 2.7 - 0.455 \cdot 0.05588 = 0.4970$$

$$h3 = h1 + h2 = 0.1955 + 0.4970 = 0.6926$$

Por motivos de seguridad se le suma el espesor del cabezal a la altura "h3".

Entonces para acabar de calcular la altura de la columna:

$$H_{columna} = (2 \cdot 0.74848) + 12 = 13.5$$

Peso de la columna

Para este cálculo se debe calcular primero el peso de la columna vacía y el peso de la columna llena cuando está operando.

Primero se calcula la masa del cuerpo, que se obtiene a partir de las dimensiones de la columna, de su espesor y de la densidad del material que la forma:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot H_{cuerpo} \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.2.7}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (2.776^2 - 2.7^2) \cdot 12 \cdot 7930 = 31104 \text{ Kg}$$

Una vez calculada la masa del cuerpo, se calcula la masa de las tapas de la siguiente forma:

$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(D_{ext,tapa}^2 - D_{int,tapa}^2)}{4} \cdot H_{tapas} \right) \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.2.8}$$



Ejemplo de cálculo:

$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(2.881^2 - 2.7^2)}{4} \cdot 0.7484 \right) \cdot 7930 = 947.2$$

Masa total:

$$M_{total} = M_{cuerpo} + M_{tapas} + M_{Platos} \quad \text{Ecuación 11.2.9}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{total} = 31104 + 947,2 + 1400 = 34419 \text{ Kg}$$

Aislamiento

Para el cálculo del aislamiento se ha utilizado el programa Insulan de la empresa CALORCOL.S.A. Dónde introduciendo los datos del material del recipiente, del material del aislante (lana de roca), la temperatura interior, 46°C, la temperatura ambiente, 25°C, y la de la superficie, que será como máximo 40°C, el programa calcula el espesor óptimo de aislante, que para este equipo será de 34mm.

11.3. Columna de Absorción W302

La función de la columna de absorción W302 es absorber todo el óxido de etileno que se encuentra fase líquida, en agua que circula en contracorriente dentro de la columna, de manera que se obtenga una corriente líquida formada por agua y óxido de etileno, además se intenta eliminar todo el Etileno y dióxido de carbono posible para aumentar la pureza al máximo.

Al igual que en la columna de absorción W301, se ha iterado el caudal de agua necesario para absorber todo el óxido de etileno. La presión a la que se realiza



esta operación es bastante baja para garantizar una mayor separación del óxido de etileno.

Por último, se ha optado para que la temperatura de entrada de la corriente principal sea de 60°C, y que la temperatura de entrada el agua sea de 30°C.

11.3.1. Diseño funcional

Para diseñar esta columna de absorción se ha utilizado el programa de simulación Aspen Hysys V10, ya que este simulador nos facilitará toda la información necesaria para dimensionar la columna.

El procedimiento para obtener las condiciones de operación es el mismo que para la columna de absorción W301, se definen en el simulador las presiones de entrada, las temperaturas de entrada, las corrientes de entrada, y la presión de operación de la torre, y este resuelve el sistema mediante iteraciones.

Las ([Tablas 11.3.1 y 11.3.2](#)) muestran las propiedades de las corrientes de entrada y salida de la columna de absorción W302.

Tabla 11.3.1 Muestra las propiedades de las corrientes de entrada y salida de la columna de absorción W302

	ENTRADA	
	Superior	Inferior
Caudal volumétrico (m ³ /h)	25.05	12.73
Caudal másico (kg/h)	25000	11300
Temperatura (°C)	30	60
Presión (kpa)	2000	2000
	SALIDA	
	Superior	Inferior
Caudal volumétrico (m ³ /h)	2.17	32.12
Caudal másico (kg/h)	1840	34460
Temperatura (°C)	43.45	32.12
Presión (kpa)	150	165

Como se puede observar en la ([Tabla 11.3.1](#)), se cumple el balance de materia:



$$E - S = 0$$

Ecuación 11.3.1

Cálculo del balance de materia:

$$25000 + 11300 - 1840 - 34460 = 0$$

Tabla 11.3.2 Fracciones másicas de las corrientes de entrada y salida.

	Entrada		Salida	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Etileno	0	0.000	0.001	0.000
Oxígeno	0	0.000	0	0.000
Óxido de etileno	0	0.777	0.342	0.237
Dióxido de carbono	0	0.106	0.637	0.001
Agua	1	0.117	0.02	0.763

11.3.2. Dimensionado

Para poder dimensionar el equipo en el simulador de Aspen Hysys V10, se le debe proporcionar el tipo de columna que se desea, es decir, si se quiere diseñar una columna de platos o de empaque.

Para esta columna se ha decidido utilizar relleno de empaque para minimizar la pérdida de presión, además, es más económico y proporciona una mayor área de contacto entre gas y líquido.

Una vez escogido el tipo de columna, se debe decidir el tipo de empaque o relleno. Para esta columna se escoge un relleno aleatorio por ser más económico que uno estructurado. En este caso se decide trabajar con el relleno "TRI-PACK" de plástico ya que ofrecen un buen rendimiento y además son compatibles con las condiciones de trabajo de esta columna.



Figura 11.3.1. Relleno TRI-PACK

Se selecciona en el simulador Aspen Hysys el relleno TRI-PACK de plástico, proporcionado por JAEGER, y este dimensiona el equipo obteniendo los datos que se muestran en la (Tabla 11.3.3):

Tabla 11.3.3. Muestra los resultados del dimensionamiento de la torre W-302

Tipo de relleno	TRI-PACK 30mm
Etapas de equilibrio	8
Diámetro (m)	1
Altura de la columna (m)	4.42
Máxima inundación (%)	55.58
Presión de diseño (kpa)	181.5
ΔP total (kpa)	0.58
ΔP /sección (kpa/m)	0.16

11.3.3. Partes internas

Distribuidor del líquido

Se sitúa en la parte superior de la columna. Cuando el líquido entra en contracorriente, el distribuidor lo reparte de forma uniforme por la capa superior del relleno para mejorar el intercambio. Se usará el mismo que en la columna de absorción W301



Soporte del empaque

Colocado en la parte inferior de la columna, está diseñado para aguantar el peso restante del empaque y también para evitar una inundación elevada. Se usará el mismo que en la columna de absorción W301

11.3.4. Diseño mecánico

Para el diseño mecánico se ha tenido en cuenta las altas temperaturas y presiones a las que trabaja el equipo, por eso los cálculos han sido realizados mediante el código ASME. El material usado para el equipo es el acero inoxidable AISI 316L ya que en esta columna se trabaja con óxido de etileno.

Presión de diseño

$$P_{diseño} = 1.1 \cdot P_{operación} \quad \text{Ecuación 11.3.2}$$

Temperatura de diseño

$$T_{diseño} = T_{operación} + 20 \quad \text{Ecuación 11.3.3}$$

Espesor del cuerpo cilíndrico

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.3.4}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- P: Presión de diseño (psi)
- R: Radio interior de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura



- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Factor de soldadura E

Dado que la unión entre placas presenta una cierta discontinuidad y además su realización puede comportar defectos, la zona donde se realiza la soldadura se puede ver debilitada, por tanto, en código ASME introduce una reducción del límite elástico haciendo el producto de este por el factor de soldadura E.

Para este caso se ha considerado que el radiografiado es parcial, es decir, que el valor de E será de 0.85.

Factor S

El factor de estrés “S” se obtiene de la siguiente tabla representada en la (Figura 11.3.2) a partir de la temperatura de diseño calculada.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)												
		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	—	—

Figura 11.3.2. Tensión máxima admisible en función de la temperatura

Como se puede observar en la (Figura 11.3.2), para este caso se obtiene un factor de estrés de 15.7 ya que nuestro material es el acero inoxidable de grado 316L y las condiciones de operación se encuentran en el rango de 86 a 140 °F.

Ejemplo de cálculo:

$$t = \frac{26.32 \cdot 19.68}{15700 \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 26.32} + 0.078 = 0.1168 \text{ inch}$$



Tabla 11.3.4. Muestra los datos y el resultado del espesor del cuerpo

P (psi)	26.32
R (inch)	19.68
S (psi)	15700
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	0.1168
t (mm)	3

Como se observa en la (Tabla 11.3.4), se obtiene un espesor de 3 mm, se decide sobredimensionar a 3.5 mm por motivos de seguridad.

Una vez conocido el espesor se procede a calcular el diámetro externo de la columna:

$$D_{ext,columna} = D_{int,columna} + 2 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.3.5}$$

Ejemplo de cálculo:

$$D_{ext,columna} = 1 + 2 \cdot 0.035 = 1.007$$

Espesor del cabezal y el fondo toriesférico

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.3.6}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- M: relación entre la longitud y el radio interno de la columna
- P: Radio interior de la columna (inch)
- L: Longitud total de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Para obtener la relación entre la longitud y el radio interno, factor “M”, se ha usado la siguiente tabla que se muestra en la (Figura 11.3.3)

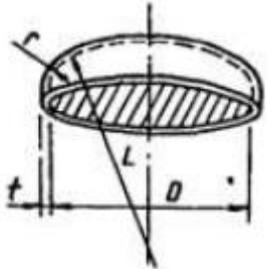
E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16^{2/3}$															
		$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1r}$														
		When L/r less than $16^{2/3}$															
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$														
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.3.3. Muestra la relación entre la longitud y el radio interno “M”

Dónde:

- L: Diámetro interno del cilindro (mm)
- r: Diámetro interno del cilindro · 0.1 (mm)

En este caso la relación entre L/r tiene un valor de 10, entonces para esta relación se mira en la (Figura 11.3.3) y se obtiene un valor de M de 1.54.

Ejemplo cálculo:

$$t = \frac{1.54 \cdot 26.32 \cdot 39.37}{2 \cdot 15700 \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 26.32} + 0.078 = 0.1378 \text{ inch}$$

Tabla 11.3.5. Muestra los datos usados para el cálculo del espesor de las tapas.

P (psi)	26.32
L (inch)	39.37
M	1.54
S (psi)	15700
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	0.1378
t (mm)	3.5

Tal y como se observa en la (Tabla 11.3.5), se obtiene un espesor del cabezal y de los fondos de $t = 3.5$ mm, se sobredimensiona a $t = 3.85$ mm por motivos de seguridad.

Altura de la columna

Para saber la altura total de la columna, se ha de saber también la longitud del cabezal y su fondo con su respectivo espesor. Se utilizan las siguientes relaciones:

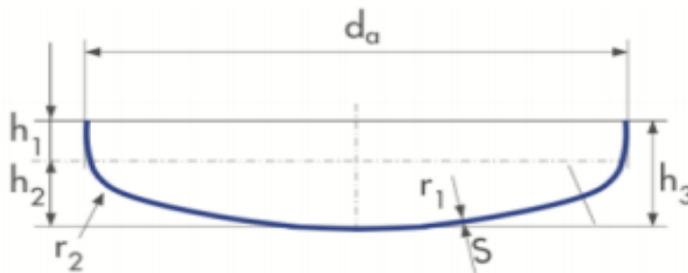


Figura 11.3.4 Muestra geometría de los cabezales y fondos

$$h_1 = 3.5 \cdot t$$

$$h_2 = 0.1935 \cdot D_a - 0.455 \cdot t$$

$$h_3 = h_1 + h_2$$



Ejemplo de cálculo:

$$h1 = 3.5 \cdot 0.00385 = 0.01347$$

$$h2 = 0.1935 \cdot 1 - 0.455 \cdot 0.00385 = 0.191748$$

$$h3 = h1 + h2 = 0.01347 + 0.191748 = 0.20522$$

Por motivos de seguridad se le suma el espesor del cabezal a la altura "h3".

Entonces para acabar de calcular la altura de la columna:

$$H_{columna} = (2 \cdot 0.209) + 4 = 4.42$$

Peso de la columna

Para este cálculo se debe calcular primero el peso de la columna vacía y el peso de la columna llena cuando está operando.

Primero se calcula la masa del cuerpo, que se obtiene a partir de las dimensiones de la columna, de su espesor y de la densidad del material que la forma:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot H_{cuerpo} \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.3.7}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (1.007^2 - 1^2) \cdot 4 \cdot 7930 = 350 \text{ Kg}$$

Una vez calculada la masa del cuerpo, se calcula la masa de las tapas de la siguiente forma:



$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(D_{ext,tapa}^2 - D_{int,tapa}^2)}{4} \cdot H_{tapas} \right) \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.3.8}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(1.007^2 - 1^2)}{4} \cdot 0.209 \right) \cdot 7930 = 6.71$$

Masa total:

$$M_{total} = M_{cuerpo} + M_{tapas} + M_{Empaque} \quad \text{Ecuación 11.3.9}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{total} = 350 + 6.71 + 320 = 683.42 \text{ kg}$$

Aislamiento

Para el cálculo del aislamiento se ha utilizado el programa Insulan de la empresa CALORCOL.S.A. Dónde introduciendo los datos del material del recipiente, del material del aislante (lana de roca), la temperatura interior, 60°C, la temperatura ambiente, 25°C, y la de la superficie, que será como máximo 40°C, el programa calcula el espesor óptimo de aislante, que para este equipo será de 60mm.

11.4. Columna de Destilación D501

La función de la columna de destilación D501 es separar el óxido de etileno del resto de componentes, de esta manera, se obtiene el óxido de etileno por la corriente superior con algunas impurezas como CO₂ y oxígeno, y por la corriente inferior se obtiene agua.

La corriente de entrada contiene pequeñas trazas de etileno, CO₂ y oxígeno, además del óxido de etileno y del agua, para ello se ha decidido usar una columna de destilación con un condensador total.

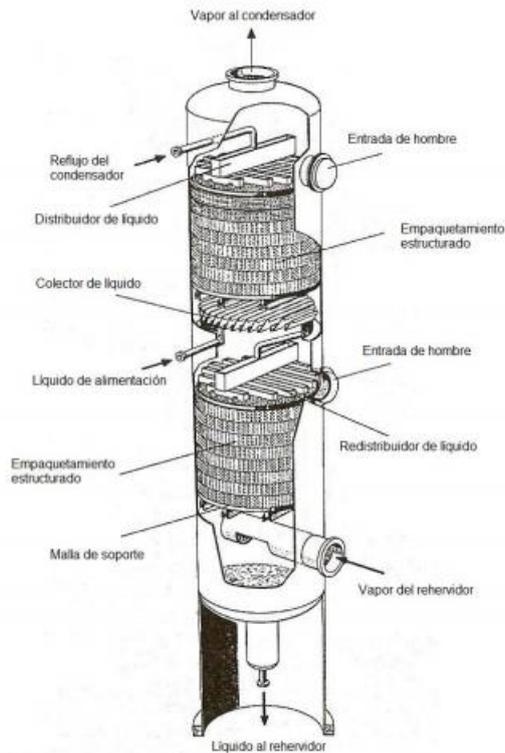


Figura 11.4.1 Muestra una torre de destilación empacada

11.4.1. Diseño funcional

El diseño de esta columna se ha llevado a cabo en el programa de simulación *Aspen Hysys V10*, ya que este programa nos facilitara la información requerida para realizar el dimensionamiento.

11.4.2. Método Riguroso

Para poder realizar el método riguroso se han introducido una serie de datos en el simulador, como la presión de operación, la temperatura de entrada, la relación de reflujo, el caudal de destilación, etc. Una vez definidos estos datos, se ha iterado hasta obtener las condiciones de operación y composiciones de



salida adecuadas para el proceso de producción, de esta manera se consigue resolver el sistema obteniendo los resultados que se muestran en las (**Tablas 11.4.1 y 11.4.2**).

Tabla 11.4.1. Resultados del método riguroso de D501 en el simulador Aspen Hysys.

	Alimento	Destilado	Residuo
Fracción de vapor	0	0	0
Temperatura (°C)	90	0	233
Presión (kpa)	800	1000	3000
Caudal molar (kmol/h)	2.03E+04	3.00E+02	2.00E+04
Caudal másico (kg/h)	3.71E+05	1.13E+04	3.60E+05
Entalpia molar (kJ/kmol)	-2.77E+05	-1.60E+05	-2.69E+05
Flujo de calor (kJ/h)	-5.63E+09	-4.81E+07	-5.37E+09
Fracción másica			
Etileno	9.89E-07	3.25E-05	1.35E-18
Oxígeno	1.49E-07	4.90E-06	5.18E-23
Óxido de etileno	2.36E-02	0.77708994	1.66E-07
Dióxido de Carbono	3.21E-03	0.10562503	5.08E-10
Agua	0.97313627	0.11724764	0.99999983
Fracción molar			
Etileno	6.45E-07	4.36E-05	8.64E-19
Oxígeno	8.53E-08	5.77E-06	2.92E-23
Óxido de etileno	9.83E-03	0.66440908	6.78E-08
Dióxido de Carbono	1.34E-03	9.04E-02	2.08E-10
Agua	0.98883573	0.24514162	0.99999993

Tabla 11.4.2. Resultados del método riguroso de D-501 en el simulador Aspen Hysys.

Numero de platos	10
Relación de reflujo	2
plato de alimentación	5
caudal molar de destilado (kmol/h)	300
Presión condensador (kpa)	1000
Presión reboiler (kpa)	3000



11.4.3. Dimensionado

Para dimensionar la columna en Aspen Hysys V10, se le debe proporcionar el tipo de columna, es decir, si se quiere diseñar una columna de platos, o de empaque.

Para esta columna se ha decidido realizar con doble empaque, es decir, del plato 1 al plato 5 se realizará con un tipo de empaque, y del plato 6 al plato 10 se realizará con otro diferente, de este modo se garantiza el correcto funcionamiento de la columna.

Para el relleno del primer empaque será de tipo “BERL”, proporcionado por la empresa GLITSCH, el material del empaque es cerámica y tiene una medida de 13-mm. Este primer empackada irá del plato 1 al plato 5 tal y como se ha descrito anteriormente.

Se selecciona en el simulador Aspen Hysys el relleno BERL de cerámica, y este dimensiona el equipo obteniendo los datos que se muestran en la (Tabla 11.4.3):

Tabla 11.4.3. Muestra las características del primer empaque de la columna D-501

Tipo de relleno	BERL 13-MM
Etapas de equilibrio	1-5
Diámetro (m)	2.3
Altura del empaque (m)	4
Altura de la columna (m)	8
Máxima inundación (%)	35.31
Presión de diseño (kpa)	3300
ΔP total (kpa)	0.8543
ΔP /seccion (kpa/m)	0.2136

Para el segundo empaque, se usará el relleno de tipo “CMR”, proporcionado también por la empresa GLITSCH, el material del empaque es cerámica, y la gama proporcionada será la NO-7. Este segundo empaque irá desde el plato 6 hasta el plato 10 tal y como se ha descrito anteriormente.

Se selecciona en el simulador Aspen Hysys el relleno CMR de cerámica, con dimensión NO-7, y este dimensiona el equipo obteniendo los datos que se muestran en la (Tabla 11.4.4):

Tabla 11.4.4 Muestra las características del segundo empaque de la columna D-501

Tipo de relleno	CMR
Etapas de equilibrio	6-10
Diámetro (m)	2.3
Altura del empaque (m)	4
Altura de la columna (m)	8
Máxima inundación (%)	97.6
Presión de diseño (kpa)	3300
ΔP total (kpa)	3.453
ΔP /sección (kpa/m)	0.8631



Figura 11.4.2. Muestra el relleno CMR

11.4.4. Diseño mecánico

Para el diseño mecánico se ha tenido en cuenta las altas temperaturas y presiones a las que trabaja el equipo, por eso los cálculos han sido realizados mediante el código ASME. El material usado para el equipo es el acero inoxidable AISI 316L ya que en esta columna se trabaja con óxido de etileno.

Presión de diseño

$$P_{diseño} = 1.1 \cdot P_{operación}$$

Ecuación 11.4.1



Temperatura de diseño

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \quad \text{Ecuación 11.4.2}$$

Espesor del cuerpo cilíndrico

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.4.3}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- P: Presión de diseño (psi)
- R: Radio interior de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Factor de soldadura E

Dado que la unión entre placas presenta una cierta discontinuidad y además su realización puede comportar defectos, la zona donde se realiza la soldadura se puede ver debilitada, por tanto, en código ASME introduce una reducción del límite elástico haciendo el producto de este por el factor de soldadura E.

Para este caso se ha considerado que el radiografiado es parcial, es decir, que el valor de E será de 0.85.

Factor S

El factor de estrés “S” se obtiene de la siguiente tabla representada en la (Figura 11.4.3) a partir de la temperatura de diseño calculada.



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	—	—

Figura 11.4.3. Tensión máxima admisible en función de la temperatura

Como se puede observar en la (Figura 11.4.3), para este caso se obtiene un factor de estrés de 15.5 ya que nuestro material es el acero inoxidable de grado 316L y las condiciones de operación se encuentran en el rango de 212 a 455 °F.

Ejemplo de cálculo:

$$t = \frac{480 \cdot 45.28}{15500 \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 480} + 0.078 = 1.764 \text{ inch}$$

Tabla 11.4.5. Muestra los datos y el resultado del espesor del cuerpo

P (psi)	480
R (inch)	45.28
S (psi)	15500
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	1.76435
t (mm)	44.7

Como se observa en la (Tabla 11.4.5), se obtiene un espesor de 44.7 mm, se decide sobredimensionar a 50 mm por motivos de seguridad.

Una vez conocido el espesor se procede a calcular el diámetro externo de la columna:

$$D_{ext,columna} = D_{int,columna} + 2 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.4.4}$$



Ejemplo de cálculo:

$$D_{ext,columna} = 2.3 + 2 \cdot 0.05 = 2.4 \text{ m}$$

Espesor del cabezal y el fondo toriesférico

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C1$$

Ecuación 11.4.5

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- M: relación entre la longitud y el radio interno de la columna
- P: Radio interior de la columna (inch)
- L: Longitud total de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Para obtener la relación entre la longitud y el radio interno, factor “M”, se ha usado la siguiente tabla que se muestra en la ([Figura 11.4.4](#))

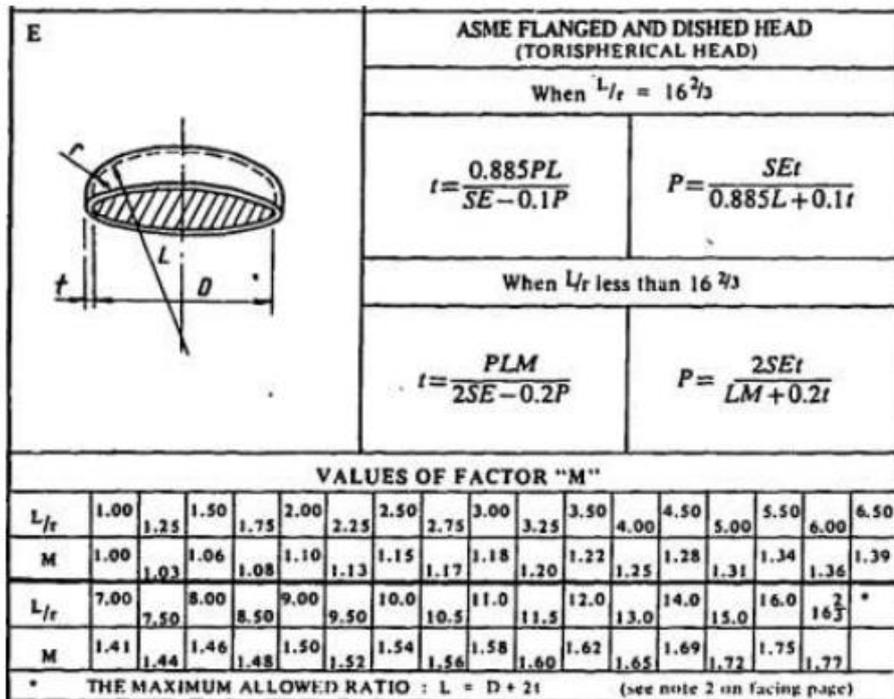


Figura 11.4.4. Muestra la relación entre la longitud y el radio interno "M"

Dónde:

- L: Diámetro interno del cilindro (mm)
- r: Diámetro interno del cilindro $\cdot 0.1$ (mm)

En este caso la relación entre L/r tiene un valor de 10, entonces para esta relación se mira en la (Figura 11.4.4) y se obtiene un valor de M de 1.54.

Ejemplo cálculo:

$$t = \frac{1.54 \cdot 480 \cdot 90.55}{2 \cdot 15500 \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 480} + 0.078 = 2.6275 \text{ inch}$$

Tabla 11.4.6. Muestra los datos usados para el cálculo del espesor de las tapas.

P (psi)	480
L (inch)	90.55
M	1.54
S (psi)	15500
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	2.6274
t (mm)	66.54

Tal y como se observa en la (Tabla 11.4.6), se obtiene un espesor del cabezal y de los fondos de $t = 66.54$ mm, se sobredimensiona a $t = 73.194$ mm por motivos de seguridad.

Altura de la columna

Para saber la altura total de la columna, se ha de saber también la longitud del cabezal y su fondo con su respectivo espesor. Se utilizan las siguientes relaciones:

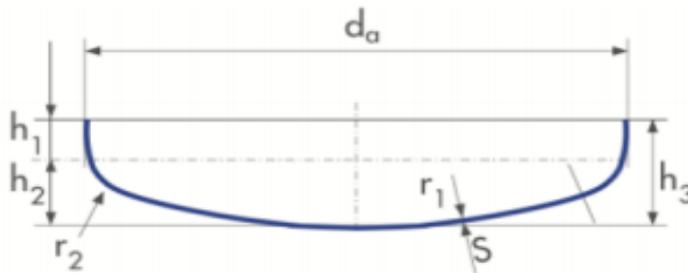


Figura 11.4.5 Muestra geometría de los cabezales y fondos

$$h1 = 3.5 \cdot t$$

$$h2 = 0.1935 \cdot Da - 0.455 \cdot t$$

$$h3 = h1 + h2$$

Ejemplo de cálculo:

$$h1 = 3.5 \cdot 0.07319 = 0.256179$$

$$h2 = 0.1935 \cdot 2.3 - 0.455 \cdot 0.07319 = 0.41174$$

$$h3 = h1 + h2 = 0.256179 + 0.41174 = 0.66792$$

Por motivos de seguridad se le suma el espesor del cabezal a la altura "h3".



Entonces para acabar de calcular la altura de la columna:

$$H_{columna} = (2 \cdot 0.741119) + 8 = 9.482239$$

Peso de la columna

Para este cálculo se debe calcular primero el peso de la columna vacía y el peso de la columna llena cuando está operando.

Primero se calcula la masa del cuerpo, que se obtiene a partir de las dimensiones de la columna, de su espesor y de la densidad del material que la forma:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot H_{cuerpo} \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.4.6}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (2.4^2 - 2.3^2) \cdot 8 \cdot 7930 = 23418.1 \text{ Kg}$$

Una vez calculada la masa del cuerpo, se calcula la masa de las tapas de la siguiente forma:

$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(D_{ext,tapa}^2 - D_{int,tapa}^2)}{4} \cdot H_{tapas} \right) \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.4.7}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(2.446^2 - 2.3^2)}{4} \cdot 0.74112 \right) \cdot 7930 = 1069.1 \text{ kg}$$

Masa total:

$$M_{total} = M_{cuerpo} + M_{tapas} + M_{Empaque} \quad \text{Ecuación 11.4.8}$$



Ejemplo de cálculo:

$$M_{total} = 23418.1 + 1069.1 + 400 = 25956.16 \text{ kg}$$

Aislamiento

Para el cálculo del aislamiento se ha utilizado el programa Insulan de la empresa CALORCOL.S.A. Dónde introduciendo los datos del material del recipiente, del material del aislante (lana de roca), la temperatura interior, 234°C, la temperatura ambiente, 25°C, y la de la superficie, que será como máximo 40°C, el programa calcula el espesor óptimo de aislante, que para este equipo será de 50mm.

11.5. Columna de Destilación D502

La función de la columna de destilación D502 es la de purificar, es decir, separar el óxido de etileno del resto de componentes para obtenerlo con la mayor fracción molar posible, de esta manera, se obtiene el óxido de etileno por la parte superior, y el agua acompañada de ligeras trazas de dióxido de carbono, por la parte inferior.

11.5.1. Diseño funcional

El diseño de esta columna, al igual que en el resto de las columnas, se ha llevado a cabo en el programa de simulación *Aspen Hysys V10*, ya que este programa nos facilitara la información requerida para realizar el dimensionamiento.

11.5.2. Método Riguroso

Para poder realizar el método riguroso, se han introducido las temperaturas, las composiciones y las presiones de entrada en el simulador, y se han iterado las presiones de operación, el caudal de destilado, el número de etapas y la



relación de reflujo hasta obtener las condiciones de operación y composiciones de salida adecuadas para nuestro proceso, de esta manera se consigue resolver el sistema obteniendo los resultados que se muestran en la (Tabla 11.5.1 y 11.5.2)

Tabla 11.5.1. Resultados del método riguroso de D502 en el simulador Aspen Hysys.

	Alimento	Destilado	Residuo
Fracción de vapor	0	0	0
Temperatura	25	4.83	99.4
Presión (kpa)	110	101.3	110
Caudal molar (kmol/h)	1.64E+03	1.84E+02	1.46E+03
Caudal másico (kg/h)	3.45E+04	8.11E+03	2.64E+04
Entalpia molar (kJ/kmol)	-2.62E+05	-8.05E+04	-2.79E+05
Flujo de calor (kJ/h)	-4.30E+08	-1.48E+07	-4.08E+08
Fracción másica			
Etileno	6.29E-09	2.67E-08	1.44E-30
Oxígeno	1.19E-09	5.07E-09	4.81E-36
Óxido de etileno	2.37E-01	0.99717887	2.65E-03
Dióxido de Carbono	6.55E-04	2.79E-03	3.34E-20
Agua	0.76277979	3.43E-05	0.99734734
Fracción molar			
Etileno	4.70E-09	4.20E-08	9.29E-31
Oxígeno	7.81E-10	6.98E-09	2.71E-36
Óxido de etileno	1.13E-01	0.9971266	1.09E-03
Dióxido de Carbono	3.12E-04	2.79E-03	1.37E-20
Agua	0.88717292	8.39E-05	0.99891354

Tabla 11.5.2. Resultados del método riguroso de D502 en el simulador Aspen Hysys.

Numero de platos	6
Relación de reflujo	2
plato de alimentación	3
caudal molar de destilado (kmol/h)	184
Presión condensador (kpa)	101.3
Presión reboiler (kpa)	110

11.5.3. Dimensionado

Para dimensionar la columna, al igual que el resto, se ha decidido usar Aspen Hysys V10, en el que se ha definido el tipo de columna.

Para esta columna se ha decidido realizar de empaque ya que tiene una mayor eficiencia debido a que el funcionamiento del relleno establece una gran superficie de contacto entre el gas y el líquido.

El relleno del empaque de la columna será de tipo “FLEXSADLPD”, proporcionado por la empresa KOCHKNIG, el material del empaque es cerámica y se ha escogido la gama NO-3.

Para dimensionar con este empaque, se selecciona en el simulador Aspen Hysys el relleno FLEXSADLPD de cerámica y con las dimensiones de NO-3, y este dimensiona el equipo obteniendo los datos que se muestran en la ([Tabla 11.5.3](#)):

Tabla 11.5.3. Muestra las características del empaque de la columna D502

Tipo de relleno	FLEXSADLPD
Etapas de equilibrio	6
Diámetro (m)	1.5
Altura del empaque (m)	5
Altura de la columna (m)	5.61
Máxima inundación (%)	77.57
Presión de diseño (kpa)	3300
ΔP total (kpa)	1.829
ΔP /sección (kpa/m)	0.3658



Figura 11.5.1. Muestra el relleno FLEXSADLPD.



11.5.4. Diseño mecánico

Para el diseño mecánico se ha tenido en cuenta las altas temperaturas y presiones a las que trabaja el equipo, por eso los cálculos han sido realizados mediante el código ASME. El material usado para el equipo es el acero inoxidable AISI 316L ya que en esta columna se trabaja con óxido de etileno.

Presión de diseño

$$P_{diseño} = 1.1 \cdot P_{operación} \quad \text{Ecuación 11.5.1}$$

Temperatura de diseño

$$T_{diseño} = T_{operación} + 20 \quad \text{Ecuación 11.5.2}$$

Espesor del cuerpo cilíndrico

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.5.3}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- P: Presión de diseño (psi)
- R: Radio interior de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)



Factor de soldadura E

Dado que la unión entre placas presenta una cierta discontinuidad y además su realización puede comportar defectos, la zona donde se realiza la soldadura se puede ver debilitada, por tanto, en código ASME introduce una reducción del límite elástico haciendo el producto de este por el factor de soldadura E.

Para este caso se ha considerado que el radiografiado es parcial, es decir, que el valor de E será de 0.85.

Factor S

El factor de estrés “S” se obtiene de la siguiente tabla representada en la (Figura 11.5.2) a partir de la temperatura de diseño calculada.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)												
		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	12,8	12,4	12,1	—	—

Figura 11.5.2. Tensión máxima admisible en función de la temperatura

Como se puede observar en la (Figura 11.5.2), para este caso se obtiene un factor de estrés de 15.7 ya que nuestro material es el acero inoxidable de grado 316L y las condiciones de operación se encuentran en el rango de 77 a 212 °F.

Ejemplo de cálculo:

$$t = \frac{17.54 \cdot 29.52}{15700 \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 17.54} + 0.078 = 0.11683 \text{ inch}$$



Tabla 11.5.4. Muestra los datos y el resultado del espesor del cuerpo

P (psi)	17.54
R (inch)	29.52
S (psi)	15700
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	0.1168
t (mm)	3

Como se observa en la (Tabla 11.5.4), se obtiene un espesor de 3 mm, se decide sobredimensionar a 3.5 mm por motivos de seguridad.

Una vez conocido el espesor se procede a calcular el diámetro externo de la columna:

$$D_{ext,columna} = D_{int,columna} + 2 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.5.4}$$

Ejemplo de cálculo:

$$D_{ext,columna} = 1.5 + 2 \cdot 0.0035 = 1.507 \text{ m}$$

Espesor del cabezal y el fondo toriesférico

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.5.5}$$

Donde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- M: relación entre la longitud y el radio interno de la columna
- P: Radio interior de la columna (inch)
- L: Longitud total de la columna (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Para obtener la relación entre la longitud y el radio interno, factor “M”, se ha usado la siguiente tabla que se muestra en la (Figura 11.5.2)

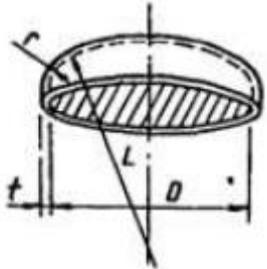
E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)																
		When $L/r = 16^{2/3}$																
		$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1r}$															
		When L/r less than $16^{2/3}$																
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$															
		VALUES OF FACTOR "M"																
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 $\frac{2}{3}$	*	
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77		
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																		

Figura 11.5.2. Muestra la relación entre la longitud y el radio interno “M”

Dónde:

- L: Diámetro interno del cilindro (mm)
- r: Diámetro interno del cilindro · 0.1 (mm)

En este caso la relación entre L/r tiene un valor de 10, entonces para esta relación se mira en la (Figura 11.5.2) y se obtiene un valor de M de 1.54.

Ejemplo cálculo:

$$t = \frac{1.54 \cdot 17.54 \cdot 59.05}{2 \cdot 15700 \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 17.54} + 0.078 = 0.1377$$

Tabla 11.5.5. Muestra los datos usados para el cálculo del espesor de las tapas.

P (psi)	17.54
L (inch)	59.05
M	1.54
S (psi)	15700
E	0.85
C1 (inch)	0.078
t (inch)	0.13776
t (mm)	3.5

Tal y como se observa en la (Tabla 11.5.5), se obtiene un espesor del cabezal y de los fondos de $t = 3.5$ mm, se sobredimensiona a $t = 3.85$ mm por motivos de seguridad.

Altura de la columna

Para saber la altura total de la columna, se ha de saber también la longitud del cabezal y su fondo con su respectivo espesor. Se utilizan las siguientes relaciones:

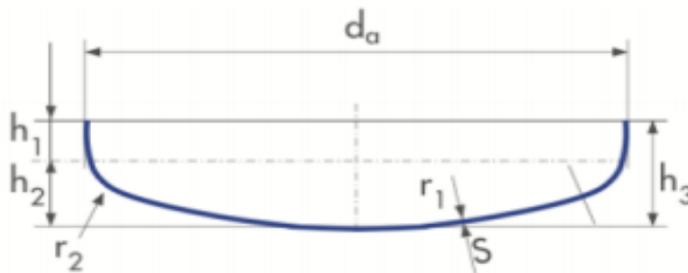


Figura 11.5.2 Muestra geometría de los cabezales y fondos

$$h1 = 3.5 \cdot t$$

$$h2 = 0.1935 \cdot Da - 0.455 \cdot t$$

$$h3 = h1 + h2$$

Ejemplo de cálculo:

$$h1 = 3.5 \cdot 0.00385 = 0.013475$$



$$h2 = 0.1935 \cdot 1.5 - 0.455 \cdot 0.00385 = 0.2884983$$

$$h3 = h1 + h2 = 0.013475 + 0.288 = 0.30197$$

Por motivos de seguridad se le suma el espesor del cabezal a la altura "h3".

Entonces para acabar de calcular la altura de la columna:

$$H_{columna} = (2 \cdot 0.30582) + 5 = 5.61$$

Peso de la columna

Para este cálculo se debe calcular primero el peso de la columna vacía y el peso de la columna llena cuando está operando.

Primero se calcula la masa del cuerpo, que se obtiene a partir de las dimensiones de la columna, de su espesor y de la densidad del material que la forma:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot H_{cuerpo} \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.5.6}$$

Ejemplo de cálculo:

$$M_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \cdot (1.507^2 - 1.5^2) \cdot 5 \cdot 7930 = 655.48 \text{ Kg}$$

Una vez calculada la masa del cuerpo, se calcula la masa de las tapas de la siguiente forma:

$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(D_{ext,tapa}^2 - D_{int,tapa}^2)}{4} \cdot H_{tapas} \right) \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.5.7}$$

Ejemplo de cálculo:



$$M_{tapas} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{(1.507^2 - 1.5^2)}{4} \cdot 0.3058 \right) \cdot 7930 = 14.704$$

Masa total:

$$M_{total} = M_{cuerpo} + M_{tapas} + M_{Empaque}$$

Ecuación 11.5.8

Ejemplo de cálculo:

$$M_{total} = 655.487 + 14.704 + 450 = 1134.89 \text{ kg}$$

Aislamiento

Para el cálculo del aislamiento se ha utilizado el programa Insulan de la empresa CALORCOL.S.A. Dónde introduciendo los datos del material del recipiente, del material del aislante (lana de roca), la temperatura interior, 100°C, la temperatura ambiente, 25°C, y la de la superficie, que será como máximo 40°C, el programa calcula el espesor óptimo de aislante, que para este equipo será de 20mm.

11.6. Separador S401

El separador vapor líquido actúa después del primer absorbedor, cuando la mayor parte del etileno y oxígeno ya han sido absorbidos, separando los restos de estos en fase gas que puedan quedar en la corriente principal.

El proceso de INDOXET5 cuenta con un separador para cada línea (S401). Se trata de un equipo de forma cilíndrica con cabezales toriesféricos. Trabajando a 3000 kPa y 100°C se consigue separar una corriente de 376 tn/h, proveniente del primer absorbedor, en una corriente de gas 5.1 tn/h con el etileno y oxígeno restantes y una corriente líquida de 371 tn/h dirigido al destilador D501.



Los datos proporcionados por el Hysys una vez convergido el proceso se muestran en la tabla 11.6.1.

Tabla 11.6.1. Datos del separador S401

	Entrada	Salida vapor	Salida líquida
Fracción de vapor	0.0011	1	0
Temperatura °C	100	99.3	99.3
Presión (kPa)	3000	800	800
Caudal molar (kmol/h)	2.041e+4	127	2.028e+4
Caudal másico (kg/h)	3.765e+5	5135	3.7e+5
	Composición (kg/h)		
Etileno	46.5	46.2	0.37
Oxígeno	2.8	2.7	0.055
Óxido de etileno	9391	609.8	8781.2
Dióxido de carbono	5373	4179.3	1193.6
Agua	361646	297.5	361348.7

El equipo tiene forma cilíndrica, con cabezales toriesféricos y posicionado verticalmente. Su dimensionamiento se ha realizado siguiendo el libro *Rules of Thumb for Chemical Engineering* ⁽⁴⁾, el cual presenta el método a seguir para poder calcular sus dimensiones:

1. Calcular el factor de separación

$$f = \frac{W_L}{W_v} \cdot \sqrt{\rho_L - \rho_V} \quad \text{Ecuación 11.6.1}$$

Donde:

- W_L : caudal de líquido a la salida (lbs/s)
- W_v : caudal de vapor a la salida (lbs/s)
- ρ_L : densidad del líquido (lbs/ft³)
- ρ_v : densidad del vapor (lbs/ft³)

2. Obtener el valor de K_v de la (figura 11.6.1) o de las ecuaciones:

$$Y = \exp(A + B \cdot X + C \cdot X^2 + D \cdot X^3 + E \cdot X^4 + F \cdot X^5) \quad \text{Ecuación 11.6.2}$$

$$X = \ln\left(\frac{W_L}{W_v} \cdot \sqrt{\rho_L - \rho_V}\right) \quad \text{Ecuación 11.6.3}$$

Donde:

- A= -1.942936
- B = -0.814894
- C = -0.179390
- D = -0.0123790
- E = 0.000386235
- F = 0.000259550

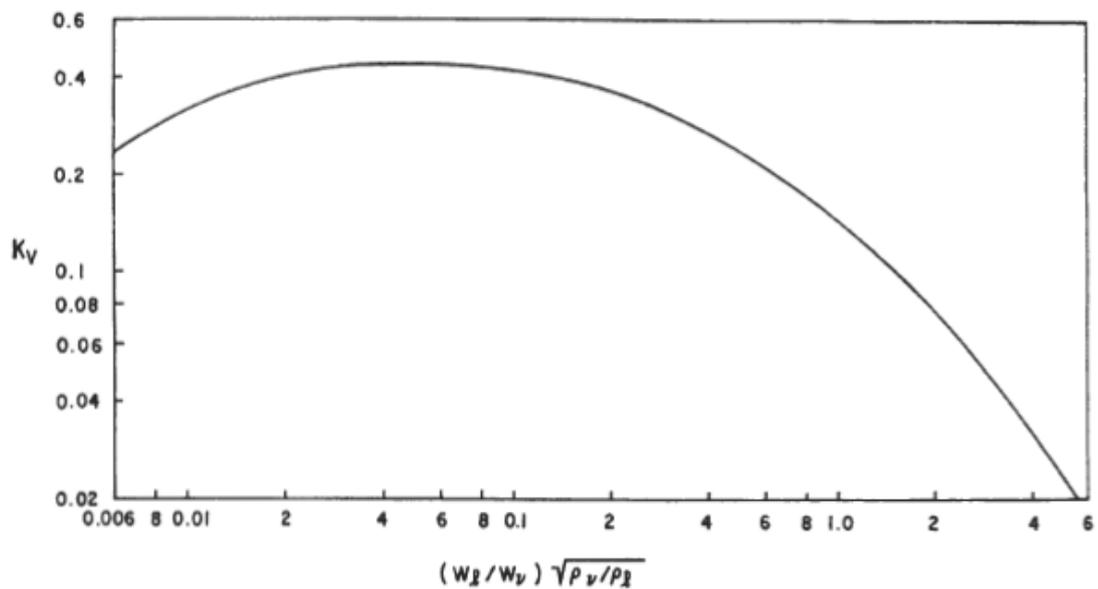


Figura 11.6.1 Factor de diseño de la velocidad del vapor para separadores verticales con inundación del 85%

3. Calcular U_v (velocidad máxima del vapor) (ft/s)

$$U_{vmax} = k \cdot \sqrt{\rho_L - \rho_V} \quad \text{Ecuación 11.6.4}$$

4. Cálculo de la sección mínima del recipiente

$$A = \frac{W_v}{U_v} \quad \text{Ecuación 11.6.5}$$

5. Definir el diámetro en base a incrementos de 6 pulgadas
6. Aproximar el diseño del equipo según la (figura 11.6.2):

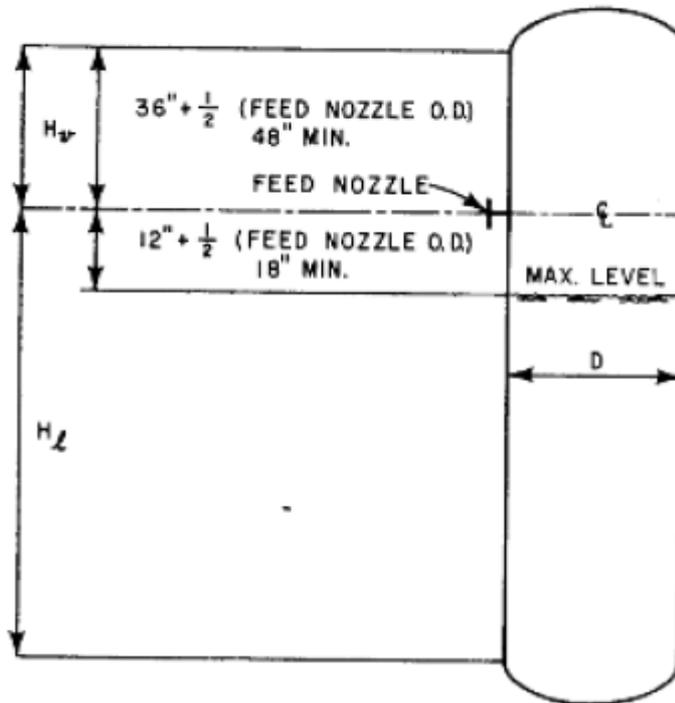


Figura 11.6.2. Aproximación para el dimensionado

- Elegir un tiempo de llenado adecuado en segundos y calcular el volumen de trabajo:

$$V = Q_L \cdot (\text{tiempo de llenado}) \quad \text{Ecuación 11.6.6}$$

Donde:

- Q_L : Caudal volumétrico de líquido (ft^3/s)

- La altura del líquido será:

$$H = V \frac{4}{D^2 \pi} \quad \text{Ecuación 11.6.7}$$

- Comprobar que la relación entre la suma de las alturas del líquido y vapor entre el diámetro esté entre 3 y 5.

Aclaración: Después de realizar varios intentos de cálculo con este proceso, los datos obtenidos no parecían ser coherentes. Por eso, se ha decidido hacer una aproximación del volumen del equipo a partir de su caudal de alimento y suponiendo un tiempo de residencia de 5 minutos para el producto. Esto



implica una futura modificación del dimensionamiento de este equipo para obtener un diseño más exhaustivo.

Tabla 11.6.1. Datos del diseño del separador S401

Volumen (m ³)	34.8
Diámetro (m)	3.09
Altura (m)	6.63

11.6.1. Diseño mecánico

Siguiendo el mismo procedimiento que para los otros equipos a presión, el separador S-401 se diseña siguiendo el código ASME, usando AISI 316L como material de construcción.

Presión de diseño

$$P_{diseño} = 1.1 \cdot P_{operación} \quad \text{Ecuación 11.6.8}$$

Temperatura de diseño

$$T_{diseño} = T_{operación} + 20 \quad \text{Ecuación 11.6.9}$$

Espesor del cuerpo cilíndrico

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.6.10}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- P: Presión de diseño (psi)
- R: Radio interior del separador (inch)
- S: Factor de estrés (psi)



- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Factor de soldadura E

Dado que la unión entre placas presenta una cierta discontinuidad y además su realización puede comportar defectos, la zona donde se realiza la soldadura se puede ver debilitada, por tanto, el código ASME introduce una reducción del límite elástico haciendo el producto de este por el factor de soldadura E.

Para este caso se ha considerado que el radiografiado es total, es decir, que el valor de E será de 1.

Factor S

El factor de estrés “S” se obtiene de la siguiente tabla representada en la (Figura 11.6.3) a partir de la temperatura de diseño calculada.

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	12,8	12,4	12,1	—	—

Figura 11.6.3. Tensión máxima admisible en función de la temperatura

Como se puede observar en la (Figura 11.6.3), para este caso se obtiene un factor de estrés de 15.7, multiplicado por 1000 para obtener psi, ya que nuestro material es el acero inoxidable de grado 316L y las condiciones de operación se encuentran en el rango de 100 a 300 °F.

El factor de tolerancia a la corrosión sirve para añadirle un espesor que proteja los equipos a lo largo de su vida útil. Normalmente se encuentra entre 1 y 6 mm, siendo de 3 mm el escogido para el reactor.



Ejemplo de cálculo:

$$t = \frac{478.5 \cdot 61.02}{15700 \cdot 1 - 0.6 \cdot 478.5} + 0.12 = 2.01 \text{ inch}$$

Tabla 11.6.2 Muestra los datos y el resultado del espesor del cuerpo

P (psi)	478.5
R (inch)	61.02
S (psi)	15700
E	1
C1 (inch)	0.12
t (inch)	2.01
t (mm)	50.36

Se obtiene un espesor de 50 mm, se decide sobredimensionar a 60 mm por motivos de seguridad.

Una vez conocido el espesor se procede a calcular el diámetro externo del separador:

$$D_{ext,separador} = D_{int,separador} + 2 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.6.11}$$

Ejemplo de cálculo:

$$D_{ext,separador} = 3.1 + 2 \cdot 0.06 = 3.22 \text{ m}$$

Espesor del cabezal y el fondo toriesférico

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C1 + C2 \quad \text{Ecuación 11.6.12}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- M: relación entre la longitud y el radio interno del separador
- P: Radio interior del separador (inch)
- L: Longitud total del separador (inch)

- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)
- C2: Tolerancia de fabricación

Para obtener la relación entre la longitud y el radio interno “M” se ha usado la siguiente tabla:

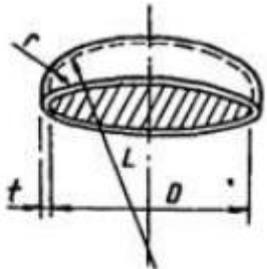
E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16^{2/3}$															
	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$		$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1r}$														
	When L/r less than $16^{2/3}$																
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$														
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.6.4 Muestra la relación entre la longitud y el radio interno “M”

Dónde:

- L: Diámetro interno del cilindro (mm)
- r: Diámetro interno del cilindro · 0.085 (mm)

En este caso la relación entre L/r tiene un valor de 11.8, entonces para esta relación se mira en la (Figura 11.6.4) y se obtiene un valor de M de 1.61.

Para los fondos toriesféricos, suelen aparecer pérdidas de espesor en las partes curvas. Para evitar esto, se ha añadido un factor igual al 10% del espesor del cuerpo.

Ejemplo cálculo:

$$t = \frac{1.61 \cdot 478.5 \cdot 114.2}{2 \cdot 15700 \cdot 1 - 0.2 \cdot 478.5} + 0.12 + 0.24 = 3.17 \text{ inch}$$

Tabla 11.6.3. Muestra los datos usados para el cálculo del espesor de las tapas.

P (psi)	478.5
L (inch)	114.2
M	1.61
S (psi)	15700
E	1
C1 (inch)	0.12
C2 (inch)	0.24
t (inch)	3.17
t (mm)	80.6

Se obtiene un espesor del cabezal y de los fondos de $t=80.6$ mm, se sobredimensiona a $t = 96.7$ mm por motivos de seguridad.

Altura del separador

Para saber la altura total del separador, se ha de saber también la longitud del cabezal y su fondo con su respectivo espesor. Se utilizan las siguientes relaciones:

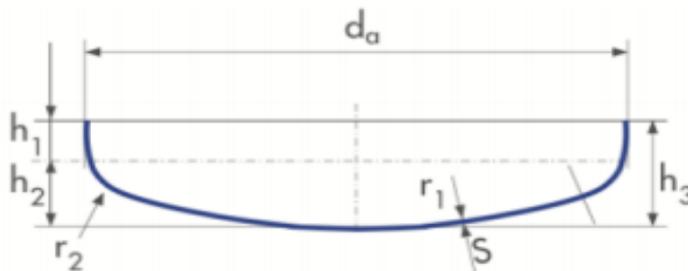


Figura 11.6.5 Muestra geometría de los cabezales y fondos

$$h1 = 3.5 \cdot t$$

Ecuación 11.6.13



$$h2 = 0.1935 \cdot da - 0.455 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.6.14}$$

$$h3 = h1 + h2 + t \quad \text{Ecuación 11.6.15}$$

Ejemplo de cálculo:

$$h1 = 3.5 \cdot 96.7 = 338.4 \text{ mm}$$

$$h2 = 0.1935 \cdot 3223 - 0.455 \cdot 96.7 = 580 \text{ mm}$$

$$h3 = h1 + h2 = 338.4 + 580 + t = 1015 \text{ mm}$$

Por motivos de seguridad se le suma el espesor del cabezal a la altura “h3”.

Entonces para acabar de calcular la altura del separador:

$$H_{\text{separador}} = (2 \cdot 1.01) + 4.6 = 6.63 \text{ m}$$

Peso del separador

Para este cálculo se debe calcular primero el peso del separador vacío y el peso del separador cuando está operando.

Primero se calcula la masa del cuerpo, que se obtiene a partir de las dimensiones del separador, de su espesor, del peso de los tubos, del catalizador y de la densidad del material que lo forma:

$$M_{\text{reactor}} = M_{\text{cilindro}} + 2M_{\text{tapas}} \quad \text{Ecuación 11.6.16}$$

$$M_{\text{cilindro}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \cdot H_{\text{cuerpo}} \cdot \rho_{\text{material}} \quad \text{Ecuación 11.6.17}$$

$$M_{\text{tapas}} = 0.08089 \cdot (D_{\text{ext}}^3 - D_{\text{int}}^3) \cdot \rho_{\text{material}} \quad \text{Ecuación 11.6.18}$$

Donde:

- $M_{\text{separador}}$: Peso total del separador vacío
- M_{cilindro} : Peso del cilindro
- M_{tapas} : Peso de las tapas



- D_{int} : Diámetro interior del separador
- D_{ext} : Diámetro exterior del separador
- $P_{material}$: densidad del material de construcción

Ejemplo de cálculo:

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot (3.22^2 - 3.1) \cdot 4.6 \cdot 8000 = 22440.8 \text{ kg}$$

$$M_{tapas} = 0.08089 \cdot (3.22^3 - 3.1^3) \cdot 8000 = 587.5 \text{ kg}$$

$$M_{separador} = 22440.8 + 574 = 22917.3 \text{ kg}$$

Para el cálculo del separador lleno:

$$M_{lleno} = M_{separador} + V_L \cdot \rho_{líquido}$$

Ecuación 11.6.19

Donde

- M_{lleno} : Peso del separador lleno
- V_L : Volumen del líquido
- $P_{líquido}$: densidad del líquido

Ejemplo de cálculo:

$$M_{lleno} = 22440.8 + 17.4 \cdot 946 = 39377.73 \text{ kg}$$

Aislamiento

Para el cálculo del aislamiento se ha utilizado el programa Insulan de la empresa CALORCOL.S.A. Dónde introduciendo los datos del material del recipiente, del material del aislante (lana de roca), la temperatura interior, 100°C, la temperatura ambiente, 25°C, y la de la superficie, que será como máximo 40°C, el programa calcula el espesor óptimo de aislante, que para este equipo será de 38.1mm.

11.7. Intercambiadores de calor

Los equipos de intercambio de calor de coraza y tubos son usados a lo largo del proceso para controlar la temperatura de las corrientes. En INDOXETH5 los intercambiadores se diferencian entre los equipos para calentar o enfriar la corriente principal y los equipos destinados a complementar las funciones de los destiladores, que consisten en condensadores y termosifones verticales.

El diseño de estos equipos se ha realizado mediante el programa ASPEN Exchanger Design and Rating, el cual, siguiendo los códigos de diseño TEMA y ASME, son capaces de realizar un diseño riguroso a partir de ciertos datos básicos de las corrientes.

El fluido utilizado para el intercambio de calor con la corriente principal será agua/vapor a diferentes presiones y temperaturas, la cual será provisionada por los equipos de servicios. Este circulará a través de la coraza de los equipos siempre, ya que por seguridad el óxido de etileno se mantendrá en el interior de los tubos.

Es necesario mencionar que para calentar el alimento del reactor R201, ha sido necesario el diseño de un tren de 7 intercambiadores, por los cuales el vapor con el que intercambia el calor circula en contracorriente desde el H107 al H101. Esta disposición ha sido diseñada como sustituta al uso de un solo intercambiador, el cual tendría un área de intercambio demasiado grande para su construcción.

11.7.1. Diseño de los intercambiadores

El primer paso para realizar el diseño de cada intercambiador consiste en especificar las condiciones en las que los fluidos entrarán al equipo. Para eso, es necesario especificar 2 de estos tres datos para cada fluido más la presión de entrada o salida:

- Caudal masico de entrada
- Temperatura de entrada
- Temperatura de salida

Los demás campos pueden ser proporcionados, pero el programa los determinará por sí solos en las iteraciones.

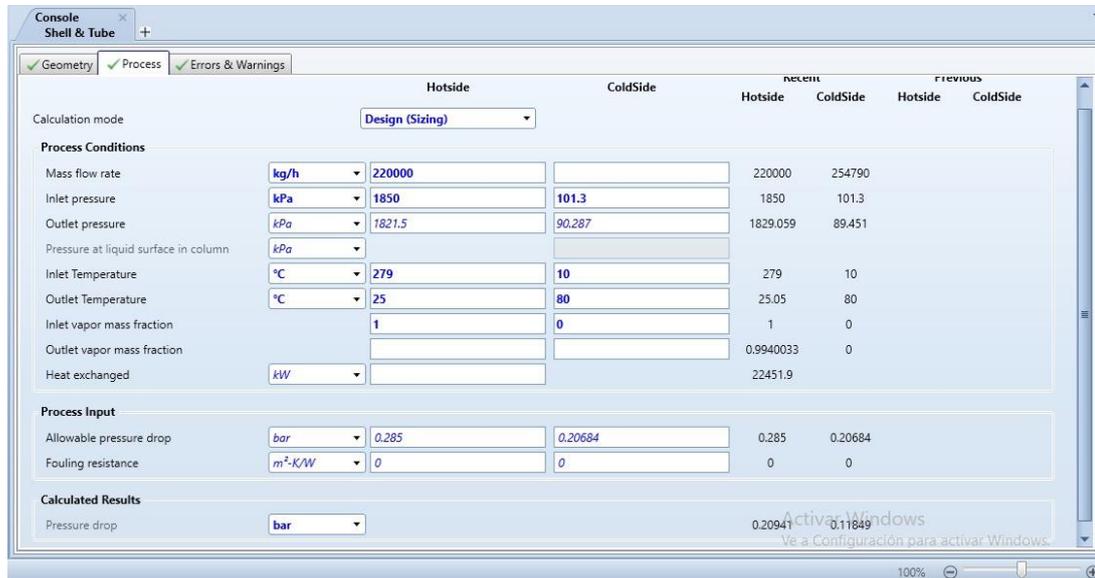


Figura 12.7.1 Interfaz del proceso del programa ASPEN Exchanger and Ratings

A continuación, en la interfaz de las (Figuras 11.7.2 y 11.7.3), se especifican las propiedades de los fluidos y su composición. Las propiedades de los fluidos vienen proporcionadas por el paquete Aspen Properties:

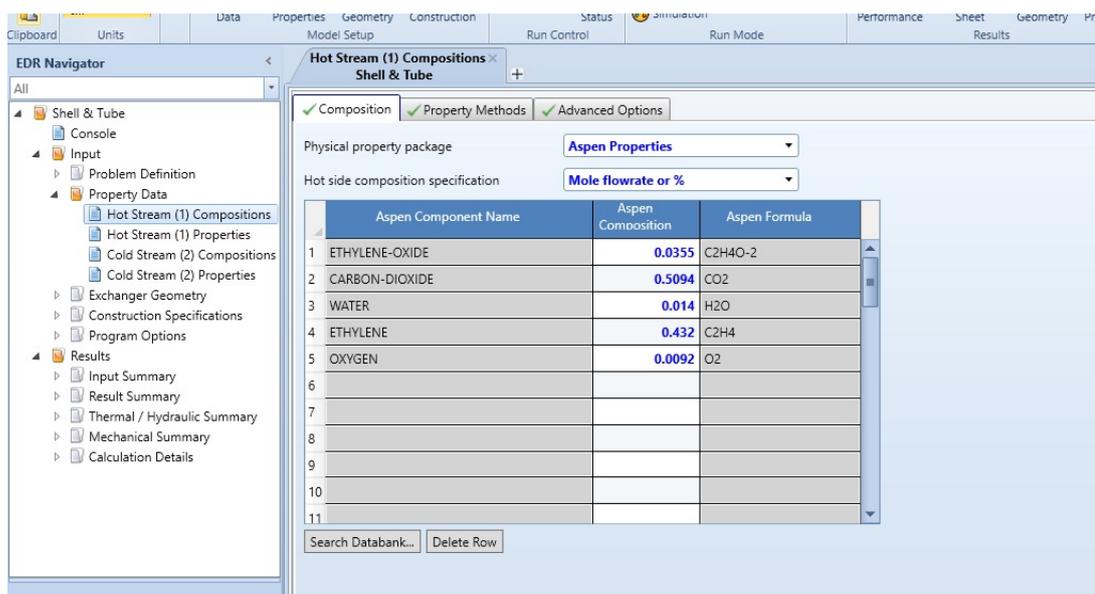


Figura 11.7.2. Interfaz de la composición del fluido caliente del programa ASPEN Exchanger and Ratings

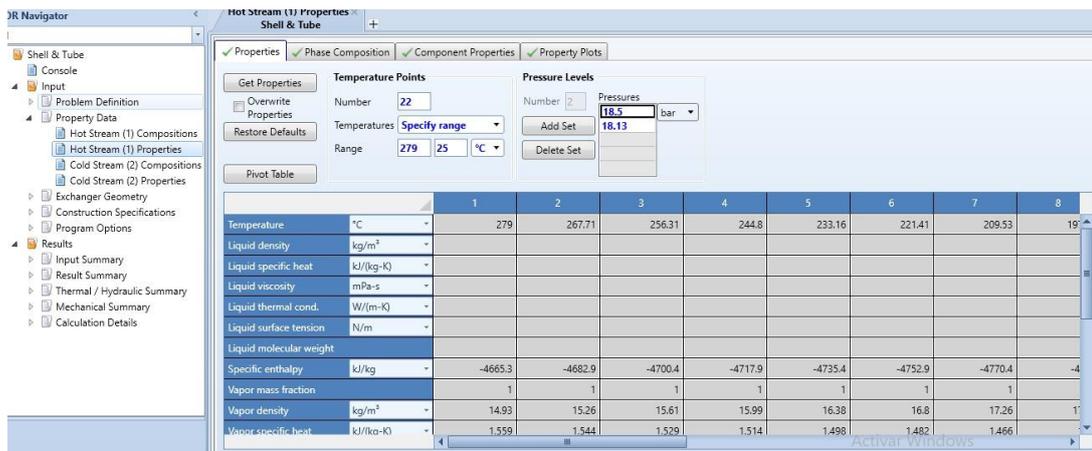


Figura 11.7.3. Interfaz de las propiedades del fluido caliente del programa ASPEN Exchanger and Ratings

Finalmente, se modifica la geometría de los equipos en la pestaña que se presenta en la (Figura 11.7.4) y se procede a activar el programa.

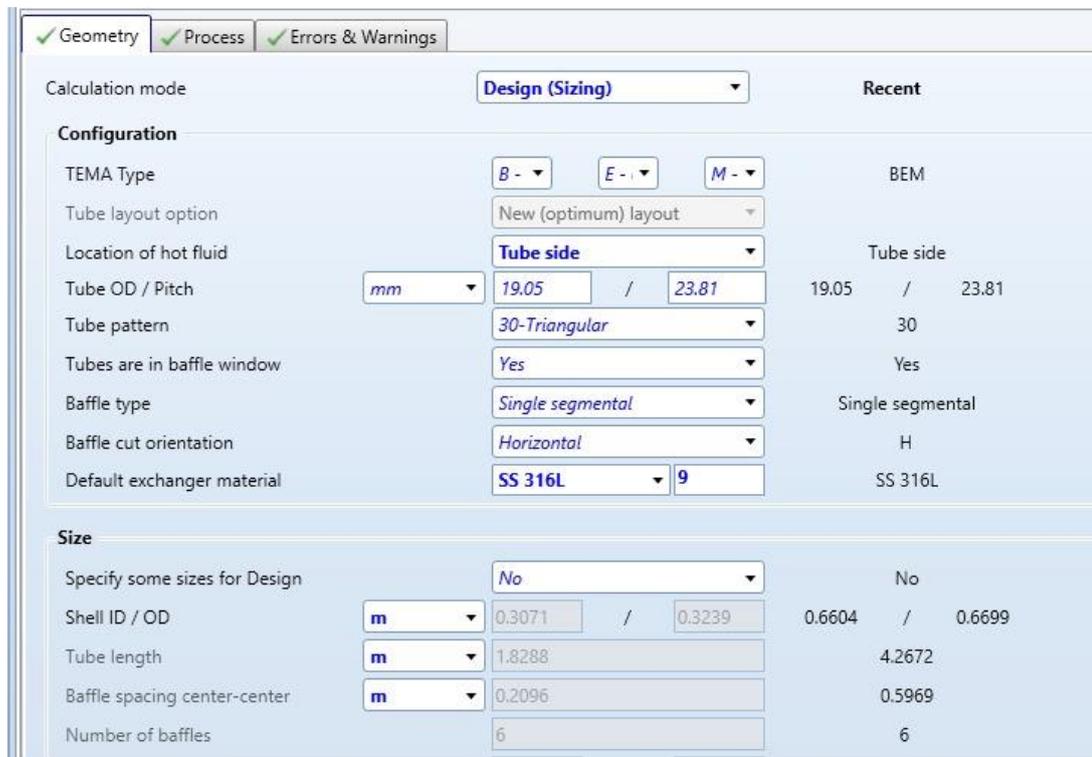


Figura 11.7.4 Interfaz de la geometría del programa ASPEN Exchanger and Ratings



El resultado obtenido con este programa se presenta en una hoja tipo TEMA, como la de la (Figura 11.7.5), a partir de la cual se han sacado los datos presentados en las hojas de especificaciones del (Volumen 2. Equipos).

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet					
1	Company:				
2	Location:				
3	Service of Unit:	Our Reference:			
4	Item No.:	Your Reference:			
5	Date:	Rev No.:	Job No.:		
6	Size :	660 - 4267.2 mm	Type:	BEM Horizontal	Connected in: 2 parallel 2 series
7	Surf/unit(eff.)	562.7 m ²	Shells/unit	4	Surf/shell(eff.) 140.7 m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT				
9	Fluid allocation	Shell Side		Tube Side	
10	Fluid name				
11	Fluid quantity, Total	70.7749		61.1111	
12	Vapor (In/Out)	kg/s	0	0	0.4206 / 0.0541
13	Liquid	kg/s	70.7749	70.7749	0 / 0.3665
14	Noncondensable	kg/s	0	0	60.6905 / 60.6905
15					
16	Temperature (In/Out)	°C	10	80	279 / 25.05
17	Bubble / Dew point	°C	101.89 / 101.89	98.51 / 98.51	-33.43 / 64.24 / -33.84 / 64.04
18	Density Vapor/Liquid	kg/m ³	/ 1008.41	/ 939.27	14.93 / 30.78 / 927.81
19	Viscosity	mPa-s	/ 1.3019	/ 0.3554	0.0223 / 0.0134 / 0.9107
20	Molecular wt, Vap				36.64 / 36.87
21	Molecular wt, NC				36.91 / 36.91
22	Specific heat	kJ/(kg-K)	/ 4.533	/ 4.56	1.559 / 1.238 / 4.058
23	Thermal conductivity	W/(m-K)	/ 0.5838	/ 0.6645	0.047 / 0.0183 / 0.4726
24	Latent heat	kJ/kg			2370.2 / 1363.9
25	Pressure (abs)	kPa	101.3	89.451	1850 / 1829.059

Figura 11.7.5. Parte de la hoja TEMA resultante del programa ASPEN Exchanger and Ratings

11.8. Tanques de almacenamiento de óxido de etileno T-601/T-602

Los tanques para el almacenamiento de óxido de etileno se han diseñado en función de la producción diaria, siempre siguiendo las normativas establecidas por las ITC MIE APQ 1 y 2, además del código ASME, ya que se trata de tanques a presión. Finalmente, para el cálculo del aislamiento necesario, se ha consultado la *Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial*⁽²⁾.

El diseño de los tanques consiste en cilindros verticales con fondos toriesféricos de acero inoxidable AISI 316L, de 150 m³ de capacidad y con unas dimensiones de 9.8 metros de altura y 5 de diámetro. El producto es almacenado en estado líquido a 5°C y 5 bares bajo presión de nitrógeno puro.



11.8.1. Dimensionamiento

Volumen de diseño

Con una producción de 8105.55 kg/h de óxido de etileno por cada línea, en 24 horas la cantidad de producto a almacenar será de 389 toneladas. Usando esta cantidad como base, y teniendo en cuenta que la cantidad máxima de óxido de etileno que puede almacenarse por dm^3 de recipiente es de 0.78 kg/dm^3 , estipulada en la ITC MIE APQ 2, se ha calculado el volumen que deberían tener 4 tanques para su almacenamiento, sobredimensionándolos un 20%.

$$P = \frac{8105.55 \text{ kg}}{h} \cdot 2 \cdot \frac{24h}{\text{dia}} = 389 \text{ tn} \quad \text{Ecuación 11.8.1}$$

$$V_{\text{tanc}} = 389 \text{ tn} \cdot \frac{1000\text{kg}}{\text{tn}} \cdot \frac{1\text{dm}^3}{0.78 \text{ kg}} \cdot \frac{1\text{m}^3}{1000\text{dm}^3} \cdot \frac{1}{4 \text{ tanques}} = \frac{124.68\text{m}^3}{\text{tanque}} \quad \text{Ecuación 11.8.2}$$

Sobredimensionando un 20% aparece el volumen final de 150 m^3 .

De este resultado también se puede obtener la cantidad de óxido de etileno que puede tener un tanque lleno:

$$M_{OE} = \frac{124.68 \text{ m}^3}{\text{tanque}} \cdot \frac{1000\text{dm}^3}{1\text{m}^3} \cdot \frac{0.78 \text{ kg}}{1\text{dm}^3} = 97250 \frac{\text{kg}}{\text{tanque}} \quad \text{Ecuación 11.8.3}$$

Partiendo de esta base, se ha estipulado que la altura de los tanques será igual a 1.5 veces su diámetro, entonces:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D^2 \quad \text{Ecuación 11.8.4}$$

$$H = 1.5 \cdot D \quad \text{Ecuación 11.8.5}$$

$$D_{\text{tanc}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{tanque}} \cdot 4}{\pi \cdot 1.5}} \quad \text{Ecuación 11.8.6}$$



Tabla 11.8.1 Datos del diseño de los tanques de óxido de etileno

Número de tanques	4
Volumen tanque (m ³)	150
Cantidad de óxido de etileno por tanque (kg)	97250
Altura tanque (m)	7.55
Diámetro tanque (m)	5.03
Presión de operación (kPa)	500
Temperatura de operación (°C)	5

11.8.2. Diseño mecánico

El siguiente paso consiste en calcular los parámetros de diseño del tanque como su espesor, su diámetro externo o las dimensiones de sus tapas. Como se trata de recipientes a presión, se sigue el código ASME con las siguientes ecuaciones:

Presión de diseño

$$P_{\text{diseño}} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}} + P_{\text{hidrostática}} = 622.4 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 11.8.7}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho \cdot g \cdot H = 897 \cdot 9.8 \cdot 7.55 = 66336 \text{ Pa} \quad \text{Ecuación 11.8.8}$$

Donde:

- ρ : Densidad del óxido de etileno (kg/m³)
- g : Gravedad (m/s²)
- H : Altura del tanque (m)

Temperatura de diseño

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 = 25^{\circ}\text{C} \quad \text{Ecuación 11.8.9}$$

Espesor del cuerpo cilíndrico

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C1 \quad \text{Ecuación 11.8.10}$$



Donde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- P: Presión de diseño (psi)
- R: Radio interior de los tanques (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)

Factor de soldadura E

Dado que la unión entre placas presenta una cierta discontinuidad y además su realización puede comportar defectos, la zona donde se realiza la soldadura se puede ver debilitada, por tanto, el código ASME introduce una reducción del límite elástico haciendo el producto de este por el factor de soldadura E.

Para este caso se ha considerado que el radiografiado es total, es decir, que el valor de E será de 1.

Factor S

El factor de estrés “S” se obtiene de la siguiente tabla representada en la (Figura 11.8.1) a partir de la temperatura de diseño calculada.

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	—	—

Figura 11.8.1 Tensión máxima admisible en función de la temperatura

Como se puede observar en la (Figura 11.8.1), para este caso se obtiene un factor de estrés de 15.7, multiplicado por 1000 para obtener psi, ya que nuestro material es el acero inoxidable de grado 316L y las condiciones de operación se encuentran en el rango de -20 a 100 °F.



El factor de tolerancia a la corrosión sirve para añadirle un espesor que proteja los equipos a lo largo de su vida útil. Normalmente se encuentra entre 1 y 6 mm, siendo de 3 mm el escogido para los tanques.

Ejemplo de cálculo:

$$t = \frac{90.3 \cdot 99}{15700 \cdot 1 - 0.6 \cdot 90.3} + 0.12 = 0.69 \text{ inch}$$

Tabla 11.8.2 Muestra los datos y el resultado del espesor del cuerpo

P (psi)	90.3
R (inch)	99
S (psi)	15700
E	1
C1 (inch)	0.12
t (inch)	0.69
t (mm)	17.3

Se obtiene un espesor de 17 mm, se decide sobredimensionar a 21 mm por motivos de seguridad.

Una vez conocido el espesor se procede a calcular el diámetro externo de los tanques:

$$D_{ext,tanque} = D_{int,tanque} + 2 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.8.11}$$

Ejemplo de cálculo:

$$D_{ext,tanque} = 5.03 + 2 \cdot 0.02 = 5.07 \text{ m}$$

Espesor del cabezal y el fondo toriesférico

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C1 + C2 \quad \text{Ecuación 11.8.12}$$

Dónde:

- t: Espesor mínimo requerido (inch)
- M: relación entre la longitud y el radio interno de los tanques
- P: Radio interior de los tanques (inch)
- L: Longitud total de (inch)
- S: Factor de estrés (psi)
- E: Coeficiente de soldadura
- C1: Tolerancia a la corrosión (inch)
- C2: Tolerancia de fabricación

Para obtener la relación entre la longitud y el radio interno “M” se ha usado la siguiente tabla:

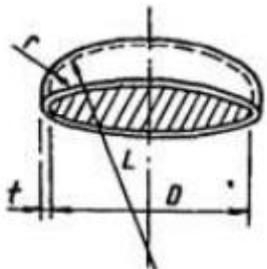
E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16^{2/3}$															
		$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$														
		When L/r less than $16^{2/3}$															
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$														
		VALUES OF FACTOR "M"															
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$				(see note 2 on facing page)													

Figura 11.8.2. Muestra la relación entre la longitud y el radio interno “M”

Dónde:

- L: Diámetro interno del cilindro (mm)



- r : Diámetro interno del cilindro $\cdot 0.085$ (mm)

En este caso la relación entre L/r tiene un valor de 11.8, entonces para esta relación se mira en la (Figura 11.8.2) y se obtiene un valor de M de 1.61.

Para los fondos toriesféricos, suelen aparecer pérdidas de espesor en las partes curvas. Para evitar esto, se ha añadido un factor igual al 10% del espesor del cuerpo.

Ejemplo cálculo:

$$t = \frac{1.61 \cdot 90.3 \cdot 179.8}{2 \cdot 15700 \cdot 1 - 0.2 \cdot 90.3} + 0.12 + 0.08 = 1.04 \text{ mm}$$

Tabla 11.8.3. Muestra los datos usados para el cálculo del espesor de las tapas.

P (psi)	90.3
L (inch)	79.8
M	1.61
S (psi)	15700
E	1
C1 (inch)	0.12
C2 (inch)	0.08
t (inch)	1.04
t (mm)	26.3

Se obtiene un espesor del cabezal y de los fondos de $t=26.3$ mm, se ha sobredimensiona a $t = 31.6$ mm por motivos de seguridad.

Altura de los tanques

Para saber la altura total de los tanques, se ha de saber también la longitud del cabezal y su fondo con su respectivo espesor. Se utilizan las siguientes relaciones:

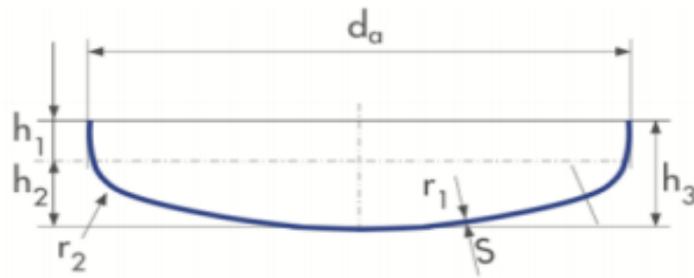


Figura 11.8.3 Muestra geometría de los cabezales y fondos

$$h_1 = 3.5 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.8.13}$$

$$h_2 = 0.1935 \cdot da - 0.455 \cdot t \quad \text{Ecuación 11.8.14}$$

$$h_3 = h_1 + h_2 + t \quad \text{Ecuación 11.8.15}$$

Ejemplo de cálculo:

$$h_1 = 3.5 \cdot 31.6 = 110.5 \text{ mm}$$

$$h_2 = 0.1935 \cdot 5073 - 0.455 \cdot 31.6 = 967 \text{ mm}$$

$$h_3 = h_1 + h_2 + t = 110.5 + 967 + 31.6 = 1109 \text{ mm}$$

Por motivos de seguridad se le suma el espesor del cabezal a la altura "h3".

Entonces para acabar de calcular la altura de los tanques:

$$H_{\text{tanque}} = (2 \cdot 1.11) + 8.7 = 9.77 \text{ m}$$

Peso de los tanques

Para este cálculo se debe calcular primero el peso de los tanques vacío y el peso de los tanques cuando está lleno.



Primero se calcula la masa del cuerpo, que se obtiene a partir de las dimensiones de los tanques, de sus tapas y de la densidad del material que lo forma:

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot H \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.8.16}$$

$$M_{tapas} = 0.08089 \cdot (D_{ext}^3 - D_{int}^3) \cdot \rho_{material} \quad \text{Ecuación 11.8.17}$$

$$M_{total} = M_{cilindro} + 2 \cdot M_{tapas} \quad \text{Ecuación 11.8.18}$$

Donde:

- $M_{cilindro}$: Peso del cilindro (kg)
- M_{tapas} : Peso de las tapas (kg)
- D_{int} : Diámetro interior de los tanques (m)
- D_{ext} : Diámetro exterior de los tanques (m)
- H : Altura de los tanques (m)
- $\rho_{material}$: Densidad del material de construcción (kg/m³)

Ejemplo de cálculo:

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot (5.07^2 - 5.03^2) \cdot 7.55 \cdot 8000 = 20197 \text{ kg}$$

$$M_{tapas} = 0.08089 \cdot (5.07^3 - 5.03^3) \cdot 8000 = 2089 \text{ kg}$$

$$M_{total} = 20197 + 2 \cdot 2089 = 24375 \text{ kg}$$

Para el cálculo de los tanques llenos:

$$V_{OE} = \frac{M_{OE}}{\rho_{OE}} \quad \text{Ecuación 11.8.19}$$

$$V_{N_2} = V_{total} - V_{OE} \quad \text{Ecuación 11.8.20}$$

Usando la ley de los gases ideales:

$$N_{N_2} = \frac{P_{Op} \cdot V_{N_2}}{R \cdot T_{Op}} \quad \text{Ecuación 11.8.21}$$

$$M_{N_2} = N \cdot PM \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \quad \text{Ecuación 11.8.22}$$

$$M_{total,lleno} = M_{total} + M_{N_2} + M_{OE} \quad \text{Ecuación 11.8.23}$$



Donde

- V_{OE} : Volumen de óxido de etileno en el tanque lleno (m^3)
- V_{total} : Volumen del tanque lleno (m^3)
- V_{N_2} : Volumen de nitrógeno en el tanque lleno (m^3)
- N_{N_2} : Moles de nitrógeno (mol)
- P_{op} : Presión de operación (Pa)
- R : constante de los gases ideales ($J/(K \cdot mol)$)
- T_{op} : Temperatura de operación (K)
- M_{N_2} : cantidad de nitrógeno en el tanque lleno (kg)
- PM : Peso molecular del nitrógeno (g/mol)

Ejemplo de cálculo:

$$V_{OE} = \frac{97250}{882} = 110.3 m^3$$

$$V_{N_2} = 150 - 110.3 = 39.7 m^3$$

$$N_{N_2} = \frac{500000 \cdot 39.7}{8.31 \cdot 278} = 8601 \text{ moles}$$

$$M_{N_2} = 8601 \cdot \frac{28}{1000} = 240.8 kg$$

$$M_{total,lleno} = 24375 + 97250 + 240.8 = 121866 kg$$

11.8.3. Diseño del aislamiento

Para evitar la posible corrosión por condensación en la superficie de los tanques, ya que se encuentran a temperatura inferior al ambiente, se ha buscado un aislante de vidrio celular, tal como recomienda la ITC MIE APQ 2. El grosor mínimo de este aislante se ha calculado siguiendo las ecuaciones descritas en la *Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial*^(y).

$$D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot d_{aislante}$$

Ecuación 11.8.24

$$\frac{\lambda}{h_e} \cdot \frac{T_d - T_i}{T_a - T_d} \leq \frac{D_{ext}}{2} \ln \frac{D_{ext}}{D_{int}}$$

Ecuación 11.8.25

Donde:



- D_{in} : Diámetro interior del tanque (m)
- D_{in} : Diámetro exterior del tanque con aislante (m)
- $d_{aislante}$: grosor mínimo del aislante (m)
- T_i : Temperatura interior del tanque (K)
- T_a : Temperatura atmosférica (en la peor situación) (K)
- T_i : Temperatura de rocío del tanque (K)
- λ : Conductividad del vidrio celular (W/(m K))
- h_e : Coeficiente superficial de transmisión de calor (W/(m²K))

Tabla 11.8.3. Datos para el cálculo del espesor mínimo del aislante

Diámetro interior del tanque (m)	5.03
Temperatura interior del tanque (K)	278
Temperatura atmosférica (en la peor situación) (K)	303
% Humedad relativa	75
Temperatura de rocío del tanque (K)	297
Conductividad del vidrio celular (W/(m K))	0.04
Coeficiente superficial de transmisión de calor (W/(m ² K))	9

Temperatura del aire ambiente °C	Humedades relativas de aire en %													
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
-20	—	10,4	9,1	8,0	7,0	6,0	5,2	4,5	3,7	2,9	2,3	1,7	1,1	0,5
-15	12,3	10,8	9,6	8,3	7,3	6,4	5,4	4,6	3,8	3,1	2,5	1,8	1,2	0,6
-10	12,9	11,3	9,9	8,7	7,6	6,6	5,7	4,8	3,9	3,2	2,5	1,8	1,2	0,6
-5	13,4	11,7	10,3	9,0	7,9	6,8	5,8	5,0	4,1	3,3	2,6	1,9	1,2	0,6
0	13,9	12,2	10,7	9,3	8,1	7,1	6,0	5,1	4,2	3,5	2,7	1,9	1,3	0,7
2	14,3	12,6	11,0	9,7	8,5	7,4	6,4	5,4	4,6	3,8	3,0	2,2	1,5	0,7
4	14,7	13,0	11,4	10,1	8,9	7,7	6,7	5,8	4,9	4,0	3,1	2,3	1,5	0,7
6	15,1	13,4	11,8	10,4	9,2	8,1	7,0	6,1	5,1	4,1	3,2	2,3	1,5	0,7
8	15,6	13,8	12,2	10,8	9,6	8,4	7,3	6,2	5,1	4,2	3,2	2,3	1,5	0,8
10	16,0	14,2	12,6	11,2	10,0	8,6	7,4	6,3	5,2	4,2	3,3	2,4	1,6	0,8
12	16,5	14,6	13,0	11,6	10,1	8,8	7,5	6,3	5,3	4,3	3,3	2,4	1,6	0,8
14	16,9	15,1	13,4	11,7	10,3	8,9	7,6	6,5	5,4	4,3	3,4	2,5	1,6	0,8
16	17,4	15,5	13,6	11,9	10,4	9,0	7,8	6,6	5,4	4,4	3,5	2,5	1,7	0,8
18	17,8	15,7	13,8	12,1	10,6	9,2	7,9	6,7	5,6	4,5	3,5	2,6	1,7	0,8
20	18,1	15,9	14,0	12,3	10,7	9,3	8,0	6,8	5,6	4,6	3,6	2,6	1,7	0,8
22	18,4	16,1	14,2	12,5	10,9	9,5	8,1	6,9	5,7	4,7	3,6	2,6	1,7	0,8
24	18,6	16,4	14,4	12,6	11,1	9,6	8,2	7,0	5,8	4,7	3,7	2,7	1,8	0,8
26	18,9	16,6	14,7	12,8	11,2	9,7	8,4	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,8	0,9
28	19,2	16,9	14,9	13,0	11,4	9,9	8,5	7,2	6,0	4,9	3,8	2,8	1,8	0,9
30	19,5	17,1	15,1	13,2	11,6	10,1	8,6	7,3	6,1	5,0	3,8	2,8	1,8	0,9
35	20,2	17,7	15,7	13,7	12,0	10,4	9,0	7,6	6,3	5,1	4,0	2,9	1,9	0,9
40	20,9	18,4	16,1	14,2	12,4	10,8	9,3	7,9	6,5	5,3	4,1	3,0	2,0	1,0
45	21,6	19,0	16,7	14,7	12,8	11,2	9,6	8,1	6,8	5,5	4,3	3,1	2,1	1,0
50	22,3	19,7	17,3	15,2	13,3	11,6	9,9	8,4	7,0	5,7	4,4	3,2	2,1	1,0

Figura 11.8.4. Temperatura e rocío en función de la temperatura ambiente y la humedad relativa

La resolución de esta ecuación requiere un proceso iterativo, del cual se obtiene un valor de espesor mínimo de 14.03 m. Como el grosor más pequeño que proporciona el proveedor es de 40 mm, el tanque quedará aislado sin problemas.

11.8.4. Diseño de los cubetos de retención

Para evitar el derrame de posibles fugas o accidentes en la zona de almacenamiento, los tanques quedaran encerrados en un área mediante el uso de cubetos. Estos estarán diseñados para poder soportar el derrame de todo el volumen de los tanques y dirigir cualquier líquido a la red de drenaje, donde posteriormente serán tratados en cubetos a distancia enterrados en el área A-800.



Los cubetos se han diseñado siguiendo las normativas establecidas por las ITC MIE APQ 1 y 2, respetando la altura máxima de los muros que lo conforman, 1 m los exteriores y 0.3 m los interiores, la orientación y pendiente hacia el lado donde los fluidos son evacuados, que será la opuesta a las tuberías de entrada y salida del producto y no adyacente al proceso, y las distancias entre tanques, que deben ser mayores a 5 m.

Teniendo estos datos en cuenta se han diseñado unos cubetos cuadrados de 12.25 m cada lado y 1 m de altura, obteniendo 600 m³ de volumen de retención total. Centrando los tanques en los cubetos, la distancia final entre las paredes de los tanques queda en 7.18 m.

11.9. Diseño de bombas

Para el correcto diseño de una bomba es imprescindible el cálculo de la potencia que necesita para impulsar el fluido hasta punto del proceso deseado. Para conocer la potencia necesaria se ha realizado un balance de energía mecánica entre estos dos puntos. La ecuación necesaria para hacer dicho balance es la siguiente:

$$E_{\text{presión}} + E_{\text{potencial}} + E_{\text{cinética}} = P_{\text{bomba}} - \text{Fricción} \quad \text{Ecuación 11.9.1}$$

Al tratarse de un fluido fase líquida e incompresible, se pasa a la (Ecuación 11.9.2).

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \Delta\left(\frac{v^2}{2\alpha}\right) = w - e_v \quad \text{Ecuación 11.9.2}$$

Dónde:

- ΔP : incremento de presión entre los puntos inicial y final. (Pa)
- Δz : incremento de altura entre los puntos inicial y final. (m)
- v : velocidad del fluido en un punto. $\left(\frac{m}{s}\right)$
- W : trabajo por unidad de masa. $\left(\frac{J}{kg}\right)$



- e_v : pérdidas de energía mecánica por fricción. $\left(\frac{J}{kg}\right)$
- ρ : densidad del fluido. $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- g : fuerza de la gravedad. $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
- α : constante.

Finalmente, la potencia de la bomba de calcularía:

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \Delta\left(\frac{v^2}{2x}\right) + e_v\right) \cdot m = W$$

Ecuación 11.9.3

Dónde:

- m : cabal másico que circula por la tubería. $\left(\frac{kg}{s}\right)$
- W : potencia teórica requerida por la bomba. $\left(\frac{J}{s}\right)$

11.9.1. Régimen del fluido

Es necesario conocer el régimen de circulación del fluido en cada tramo, por lo que se aplica la (**Ecuación 11.9.4**).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Ecuación 11.9.4

Dónde:

- ρ : densidad del fluido. $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- v : velocidad del fluido. $\left(\frac{m}{s}\right)$
- D : diámetro de la tubería. (m)
- μ : viscosidad del fluido. $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$



El cálculo de la velocidad del fluido se realiza a través del caudal que circula por el interior de la tubería y el área de paso de esta, mediante las (**Ecuaciones 11.9.5 y 11.9.6**).

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{Ecuación 11.9.5}$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 11.9.6}$$

Dónde:

- A: área de paso de la tubería.
- D: diámetro de la tubería.
- Q: caudal que circula.
- v: velocidad del fluido.

Con el cálculo del número de Reynolds, el cociente entre rugosidad y diámetro de la tubería (**Ecuación 11.9.7**) y la gráfica de Moody (**Figura 11.9.1**) se puede hallar el factor de Fanning (f).

$$\frac{\varepsilon}{D} \quad \text{Ecuación 11.9.7}$$

Dónde:

- ε = Rugosidad (m)
- D= Diámetro de tubería (m)

En la siguiente tabla (**Tabla 11.9.1**) se puede observar los diferentes valores del parámetro de la rugosidad que va en función del material.

Tabla 11.9.1: Tabla información sobre la rugosidad de los materiales

Material	Rugosidad ε (m)
Vidrio o plástico	Tubo liso
Tuberías de cobre/latón/plomo	$1.5 \cdot 10^{-6}$

Hierro de fundición sin revestimiento	$2.5 \cdot 10^{-4}$
Hierro de fundición revestido de asfalto	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Acero comercial/acero soldado	$4.6 \cdot 10^{-5}$
Hierro forjado	$4.6 \cdot 10^{-6}$
Acero remachado	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Hierro galvanizado	$1.6 \cdot 10^{-4}$
Hormigón	$1.2 \cdot 10^{-3}$

En INDOXETH5 se trabaja con acero inoxidable 316, por lo cual la rugosidad usada para encontrar el factor de Fanning es 4.6×10^{-5} .

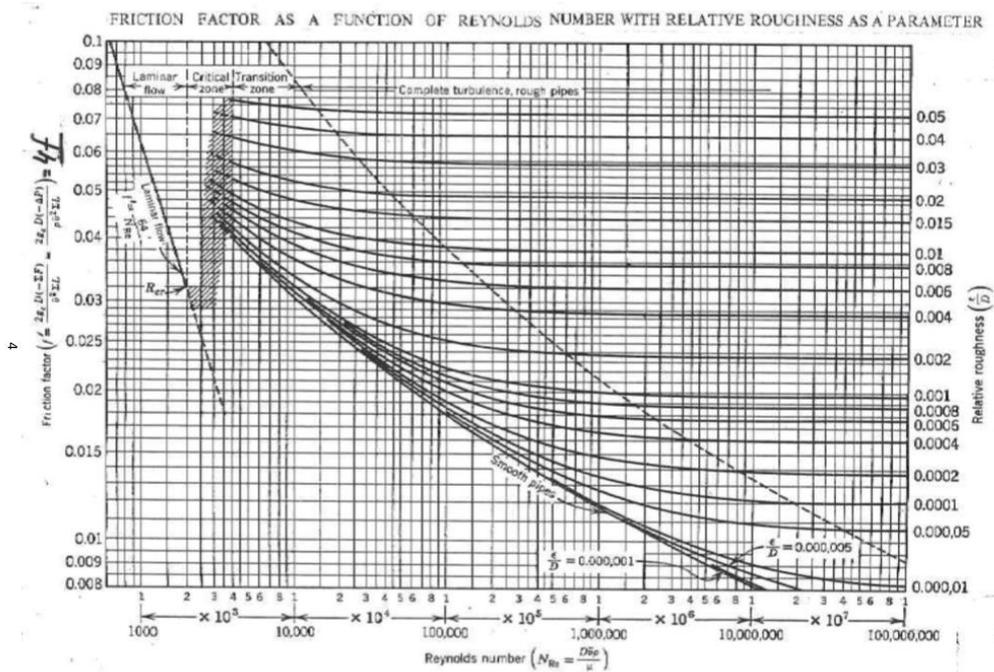


Figura 11.9.1. Gráfica de Moody.

11.9.2. Pérdidas de carga por fricción

La fricción producida en las tuberías supone una pérdida de la energía mecánica del fluido (**Ecuación 11.9.8**).

$$e_v = e_{v \text{ tramo recto}} + e_{v \text{ accidentes}}$$

Ecuación 11.9.8



Cuando se traslada el fluido de un punto A hacia un punto D existirán puntos intermedios, B y C de tal manera que el fluido hará el siguiente recorrido:

- Parte del punto A, hacia el punto B (punto que se encuentra justo antes de la bomba), seguidamente parte del punto C (punto que se encuentra justo después de la bomba) hacia el punto D.

De tal manera que el primer tramo $A \rightarrow B$ se llama “tramos de aspiración” y el segundo tramo $C \rightarrow D$ se llamará “tramos de impulsión”.

Tanto en los tramos de aspiración como en el tramo de impulsión existirán los dos tramos especificados en la **Ecuación 11.9.8**, que se definen a continuación:

- Pérdidas en tramos rectos ($e_{v\ tramo\ recto}$): se trata de las pérdidas producidas por la fricción del fluido y las paredes de la tubería. Para el cálculo de estas pérdidas se usa la (**Ecuación 11.9.9**).

$$e_{v\ tramo\ recto} = 4fv^2 \quad \text{Ecuación 11.9.9}$$

Dónde:

- f: factor de Fanning.
 - v: velocidad del fluido. $\left(\frac{m}{s}\right)$
 - L: longitud de la tubería. (m)
 - D: diámetro de la tubería. (m)
- Pérdidas por accidentes ($e_{v\ accidentes}$): se trata de las pérdidas producidas por los accidentes presentes a lo largo de las tuberías, como por ejemplo codos. Este cálculo se realiza mediante la (**Ecuación 11.9.10**).

$$e_{v\ accidentes} = \sum K \frac{v^2}{2} \quad \text{Ecuación 11.9.10}$$

Dónde:



- K: constante específica del accidente.
- v: velocidad del fluido. $\left(\frac{m}{s}\right)$

Finalmente, para obtener las pérdidas totales en cada tramo, es necesario sumar las del tramo de aspiración con el tramo de impulsión (**Ecuación 11.9.11**).

$$e_{v \text{ tramo aspiración}} + e_{v \text{ tramo impulsión}} = e_{v \text{ total}} \quad \text{Ecuación 11.9.11}$$

11.9.3. Potencia real

Siguiendo los pasos descritos anteriormente, se calcula la potencia de la bomba mediante la (**Ecuación 11.9.2**), no obstante, el valor obtenido es un valor teórico que se debe ajustar a la realidad teniendo en cuenta el rendimiento de la bomba, que no será del 100%. Para ello, se utiliza la (**Ecuación 11.9.12**).

$$W_{real} = \frac{W_{teórica}}{\eta} \quad \text{Ecuación 11.9.12}$$

Dónde:

- W: potencia de la bomba. $\left(\frac{J}{s}\right)$
- η : rendimiento de la bomba

11.9.4. Ejemplo de cálculo

A continuación, se ha escogido la bomba P501a, que se encarga de trasladar el fluido que sale del separador S401a al destilador D501a.



$$\frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \Delta \left(\frac{v^2}{2\alpha} \right) = w - e_v$$

- Empezando por el primer término de la **Ecuación 11.9.1**, ligadas a la presión, se llega a la conclusión de que este término es nulo, ya que:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 800000Pa - 800000Pa = 0$$

- El segundo término de la **Ecuación 11.9.1**, está ligado a la energía potencial, se calculará de la siguiente manera:

$$g\Delta z = 9.8 \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot 2.46m = 24.1 \left(\frac{m^2}{s^2} \right)$$

- El tercer término de la **Ecuación 11.9.1**, está ligado a la energía cinética:

En este caso el Δv es igual a:

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 2.22 \left(\frac{m}{s} \right) - 0 \left(\frac{m}{s} \right) = 2.22 \left(\frac{m}{s} \right)$$

Ya que el primer punto se contemplará dentro del separador, dónde se encuentra el líquido en reposo, siendo aquí la $v_1 = 0 \frac{m}{s}$

$$\frac{v^2}{2\alpha} = \frac{2.22^2}{2 \cdot 1} \left(\frac{m}{s} \right)^2 = 2.5 \left(\frac{m^2}{s^2} \right)$$

- El segundo término después de la igualdad de la **Ecuación 11.9.1**, hace referencia a las pérdidas de carga, por lo se calculará de la siguiente manera:

- Tramo aspiración:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{946 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \cdot 2.22 \frac{m}{s} \cdot 0.263 m}{0.001 \left(\frac{Kg}{m \cdot s} \right)} = 5.52 \times 10^5$$



$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4.6 \times 10^{-5} m}{0.263 m} = 1.75 \times 10^{-4}$$

Usando estos datos en la (**Figura 11.9.1**), se obtiene un valor de $4f$ igual 1.51×10^{-2} , el cuál será usado para encontrar las pérdidas del tramo recto:

$$e_{v \text{ tramo recto}} = 4f v^2 \frac{L}{D} = 1.51 \times 10^{-2} \cdot 2.22^2 \left(\frac{m}{s}\right)^2 \cdot \frac{110.72 m}{0.263 m} = 31.25 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

Para poder calcular las pérdidas por accidentes, hace falta conocer los accidentes y su valor "K", estos se muestran a continuación en la (**Tabla 11.9.2**).

Tabla 11.9.2: Tabla información sobre el tipo de accidentes y el valor de "K" correspondientes al tramo de aspiración

Accidente	Nº de accidentes	K
Válvula bola manual	1	$5 \cdot 10^{-2}$
Válvula bola automática	1	$5 \cdot 10^{-2}$
Válvula de mariposa	1	$2.4 \cdot 10^{-1}$
Válvula de retención	1	10
Codos	4	$7.5 \cdot 10^{-1}$

Con estos datos se calcula el total del valor de los accidentes:

$$\sum K = 13.34$$

Y seguidamente se podrá encontrar el valor de las pérdidas ocasionados por estos:

$$e_{v \text{ accidentes}} = \sum K \frac{v^2}{2} = 13.34 \cdot \frac{2.22^2}{2} \left(\frac{m}{s}\right)^2 = 32.9 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

Una vez conocidas las pérdidas del tramo recto con la de los accidentes, se puede calcular las pérdidas en el tramo de aspiración, que serán:

$$e_{v \text{ aspiración}} = e_{v \text{ tramo recto}} + e_{v \text{ accidentes}} = 64.12 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$



- Tramo impulsión:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{947 \left(\frac{Kg}{m^3}\right) \cdot 2.22 \frac{m}{s} \cdot 0.263 m}{0.001 \left(\frac{Kg}{m \cdot s}\right)} = 5.53 \times 10^5$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4.6 \times 10^{-5} m}{0.263 m} = 1.75 \times 10^{-4}$$

Usando estos datos en la (Figura 11.9.1), se obtiene un valor de $4f$ igual 1.51×10^{-2} , el cuál será usado para encontrar las pérdidas del tramo recto:

$$e_{v \text{ tramo recto}} = 4f v^2 \frac{L}{D} = 1.51 \times 10^{-2} \cdot 2.22^2 \left(\frac{m}{s}\right)^2 \cdot \frac{5.05 m}{0.263 m} = 1.43 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

Para poder calcular las pérdidas por accidentes, hace falta conocer los accidentes y su valor "K", estos se muestran a continuación en la (Tabla 11.9.3)

Tabla 11.9.3: Tabla información sobre el tipo de accidentes y el valor de "K" correspondientes al tramo de impulsión

Accidente	Nº de accidentes	K
Válvula bola manual	1	$5 \cdot 10^{-2}$
Válvula bola automática	1	$5 \cdot 10^{-2}$
Válvula de mariposa	1	$2.4 \cdot 10^{-1}$
Válvula de retención	1	10
Codos	2	$7.5 \cdot 10^{-1}$

Con estos datos se calcula el total del valor de los accidentes:

$$\sum K = 11.84$$

Y seguidamente se podrá encontrar el valor de las pérdidas ocasionados por estos:



$$e_{v \text{ accidentes}} = \sum K \frac{v^2}{2} = 11.84 \cdot \frac{2.22^2}{2} \left(\frac{m}{s}\right)^2 = 29.2 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

Una vez conocidas las pérdidas del tramo recto con la de los accidentes, se puede calcular las pérdidas en el tramo de impulsión, que serán:

$$e_{v \text{ impulsión}} = e_{v \text{ tramo recto}} + e_{v \text{ accidentes}} = 30.6 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

Conocidos los valores del tramo de aspiración y del tramo de impulsión, se procede a sumarlos y conocer las pérdidas totales que existen desde el equipo S401a al D501a:

$$e_{v \text{ total}} = e_{v \text{ tramo aspiración}} + e_{v \text{ tramo impulsión}} = 94.72 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

- Cálculo de w :

$$w = \frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \Delta \left(\frac{v^2}{2\alpha}\right) + e_v = 121.24 \frac{J}{Kg}$$

- Cálculo de la $W_{teórica}$:

$$W_{teórica} = m \cdot w = 103.14 \frac{Kg}{s} \cdot 121.24 \frac{J}{Kg} = 12.5 \times 10^3 \frac{J}{s} \cong 12.5 kW$$

- Cálculo de la W_{real}

$$W_{real} = \frac{W_{teórica}}{\eta} = \frac{12.5 kW}{0.75} = 16.7 kW$$

11.10. Diseño de compresores

El diseño de los compresores utilizados en INDOXETH5 se ha realizado mediante el software de simulación ASPEN HYSYS. Se muestra en la ([Tabla 11.10.1](#)) los resultados obtenidos en la simulación de cada compresor.

Tabla 11.10.1. Resultados obtenidos en HYSYS para la simulación de los compresores del proceso.

	K101a/b	K102a/b	K103a/b	K104a/b	K301a/b	K1101a/b
Adiabatic Head (m)	10260	14370	12170	515.2	973.3	20260
Polytropic Head (m)	10630	15220	12410	515.7	975.2	21650
Adiabatic Fluid Head (kJ/kg)	100.7	144.5	119.3	5.052	9.544	198.7
Polytropic Fluid Head (kJ/kg)	104.3	149.3	121.7	5.057	9.564	212.3
Adiabatic Efficiency	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000
Polytropic Efficiency	77.686	77.500	76.531	75.081	75.151	80.151
Power Consumed (kW)	405.30	581.70	480.40	411.6	777.70	61.90
Polytropic Head Factor	1.0018	1.0018	1.0005	1.0000	1.0000	1.0016
Polytropic Exponent	1.4082	1.3469	1.3101	1.2686	1.2599	1.5469
Isentropic Exponent	1.2957	1.2546	1.225	1.1890	1.183	1.3983

11.11. Diseño de equipos de servicio

11.11.1. Chiller

Dado que en el proceso productivo que se da en INDOXETH5 se requiere agua fría en distintos puntos de las líneas, es necesario un sistema de refrigeración del agua de proceso.

Se muestra a continuación en la (Tabla 11.11.1) los equipos que requieren agua fría para su correcto funcionamiento, la temperatura de entrada del agua a cada equipo y la temperatura de salida. Dado que la corriente de vapor generada en el reactor R201a/b es utilizado en intercambiadores de la línea para calentar el fluido de proceso, se coge para el diseño del chiller, la temperatura a la que sale este corriente del intercambiador H302a/b.

Tabla 11.11.1. Necesidades de agua fría según el equipo.

Equipo	T entrada (°C)	T salida (°C)	Caudal agua (kg/h)
R201a/b	10	91.02	42511
H301a/b	10	80	254790



Equipo	T entrada (°C)	T salida (°C)	Caudal agua (kg/h)
H501a/b	10	28	11115
TOTAL	10	79.64	308400

Los valores que se muestran en la ([Tabla 11.11.1](#)) corresponden a valores que se han encontrado tal y como se explica en el apartado ([11.7.1. Diseño de intercambiadores](#)).

Con el siguiente cálculo se ha obtenido el caudal másico de agua fría necesario en cada línea. Con este dato y la ([Ecuación 11.11.1](#)) se puede calcular el intercambio de calor necesario para volver a enfriar el agua hasta 10 °C.

$$Q = m_{\text{agua total}} \overline{C_p} (T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}}) \quad \text{Ecuación 11.11.1}$$

Dónde:

- Q: calor necesario para enfriar el agua.
- $m_{\text{agua total}}$: caudal másico total de agua.
- C_p : calor específico medio del agua.
- T_{entrada} : temperatura de entrada del agua a la torre de refrigeración.
- T_{salida} : temperatura de salida del agua de la torre de refrigeración.

$$Q = 86 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4188 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{s}} \cdot (80 - 10)^\circ\text{C} = 2.512 \times 10^7 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Para calcular la potencia frigorífica de la torre, se sobredimensiona un 25% como se muestra en la ([Ecuación 11.11.2](#)).

$$P = 1.25 Q \quad \text{Ecuación 11.11.2}$$

Dónde:

- P: potencia térmica.



- Q: calor necesario para enfriar el agua.

$$P = 1.25 \cdot 2.512 \times 10^7 \frac{J}{s} = 3.140 \frac{J}{s}$$

Pérdidas por arrastre

Se puede considerar que cerca de un 0.01% del caudal de agua de refrigeración se pierde debido al arrastre en forma de gotas. Por lo que el cálculo de las pérdidas por arrastre viene dado por la (**Ecuación 11.11.3**).

$$m_g = 0.0001 m$$

Ecuación 11.11.3

Dónde:

- m_g : caudal de agua perdido por el arrastre.
- m : caudal de agua de refrigeración.

$$m_g = 0.0001 \cdot 3,08 \times 10^5 \frac{kg}{h} = 30.8 \frac{kg}{h}$$

11.11.2. Caldera

En el proceso productivo de INDOXETH5, se requiere también calor para calentar el fluido de proceso hasta la temperatura deseada. Para los equipos de intercambio de calor H401a/b y H302a/b se utilizará el vapor generado en el reactor, pero para los intercambiadores H101, H102, H103, H104, H105, H106 y H107 de las líneas a y b se requiere de una caldera para calentarlo.

Se muestra a continuación en la (**Tabla 11.11.2**) el equipo que requiere calor, la temperatura de entrada del vapor a la caldera, la temperatura de salida de este y el caudal másico necesario.

Para poder suplir el agua que se necesitará para calentar estos intercambiadores y para no hacer gastos excesivos en el agua, se ha utilizado un mismo cabal que recirculará por todos los intercambiadores, de manera que, el vapor de la salida de la camisa del intercambiador H107, entrará a la



camisa del intercambiador H106 y así sucesivamente hasta llegar al intercambiador H101. Es una opción viable ya que en el intercambiador H107 la temperatura de salida tiene que ser 300°C y en el H101 de 155°C, también de esta manera se reducen los gastos de agua y además se respetará el intervalo de salto de temperatura de cada intercambiador.

Del mismo modo que para las necesidades de frío, se calcula el caudal de calor necesario con la ([Ecuación 11.11.4](#)) y los datos obtenidos a partir del diseño que se ha efectuado con ASPEN Exchanger Design, tal y como se muestra en el apartado ([11.7.1. Diseño de intercambiadores](#)).

$$Q = m_{vap} \overline{Cp} (T_{entrada} - T_{salida}) \quad \text{Ecuación 11.11.4}$$

Dónde:

- Q: caudal de calor necesario para calentar.
- m_{vap} : caudal másico de vapor necesario.
- Cp: calor específico medio del vapor.
- $T_{entrada}$: temperatura de entrada del vapor a la caldera.
- T_{salida} : temperatura de salida del vapor de la caldera.

$$Q = 86 \frac{kg}{s} \cdot 5402.5 \frac{J}{kg \cdot s} \cdot (8300 - 155)^{\circ}C = 4.171 \times 10^7 \frac{J}{s}$$

Para calcular la potencia térmica de la caldera, se sobredimensiona un 25% como se muestra en la ([Ecuación 11.11.5](#)).

$$P = 1.25 Q \quad \text{Ecuación 11.11.5}$$

$$P = 1.25 \cdot 4.171 \times 10^7 \frac{J}{s} = 5.213 \times 10^7 \frac{J}{s}$$

En la caldera, se usa gas natural como combustible, por lo que las necesidades de gas natural se han calculado siguiendo la ([Ecuación 11.11.6](#)).



$$Q_{gas\ natural} = \frac{P}{PCI_{gas\ natural} \eta} \quad \text{Ecuación 11.11.6}$$

Dónde:

- $Q_{gas\ natural}$: caudal másico de gas natural.
- P: potencia de la caldera.
- $PCI_{gas\ natural}$: poder calorífico inferior = 46367 kJ/kg
- η : rendimiento de la caldera.

$$Q_{gas\ natural} = \frac{5.213 \times 10^4 \text{ kW}}{46367 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0.85} = 1.323 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

11.11.3. Aire comprimido

Las válvulas de control necesitan aire comprimido para su correcto funcionamiento. Se estima que el consumo de aire comprimido es de unos 3 m³ por hora y por válvula, por este motivo, se ha calculado las necesidades de aire comprimido siguiendo la (Ecuación 11.11.7).

$$Q_{aire\ comprimido} = \frac{\text{Consumo}}{\text{válvula}} n^{\circ} \text{ de válvulas} \quad \text{Ecuación 11.11.7}$$

Para la obtención del aire comprimido, se ha diseñado el compresor K1101, cuyas características de diseño se muestran en la (Tabla 11.10.1).

$$Q_{aire\ comprimido} = 3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 75 = 225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

11.11.4. Nitrógeno

En INDOXETH5, el uso de nitrógeno gas se destina principalmente a la presurización de los tanques de óxido de etileno y de las cisternas de transporte, con el fin de evitar mantener el producto siempre en su zona de seguridad, tal como se describe en el (Volumen 5. Seguridad e higiene).



Anualmente, también es necesario realizar la completa inertización de todos los equipos del proceso.

Para prevenir cualquier accidente en el peor de los casos, se han calculado las necesidades de nitrógeno suponiendo que todo el volumen de los tanques y cisternas queda completamente lleno de nitrógeno una vez al día.

A partir de la producción diaria para las dos líneas y teniendo en cuenta la cantidad máxima de óxido de etileno que se puede almacenar en los recipientes según la ITC MIE APQ 2, se calcula el número de cisternas diarias necesarias para distribuir el producto:

$$\frac{398 \cdot 10^3 \text{ kg OE}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ L de recipiente}}{0.78 \text{ kg OE}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = \frac{498.7 \text{ m}^3 \text{ de recipiente}}{\text{día}} \quad \text{Ecuación 11.11.8}$$

Suponiendo que una cisterna para el transporte de óxido de etileno tiene una capacidad de 30 m³:

$$\frac{498.7 \text{ m}^3 \text{ de recipiente}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ cisterna}}{30 \text{ m}^3 \text{ de recipiente}} = \frac{17 \text{ cisternas}}{\text{día}} \quad \text{Ecuación 11.11.9}$$

Con estos datos, se calcula el volumen total a llenar para un mes de producción:

$$V_{total} = (V_{tanques} \cdot N_{tanques} + V_{cisternas} \cdot N_{cisternas}) \cdot 30 \quad \text{Ecuación 11.11.10}$$

$$V_{total} = (150 \cdot 4 + 30 \cdot 17) \cdot 30 = 33300 \text{ m}^3$$

Donde:

- V_{total} : Volumen a llenar en 30 días
- $V_{tanques}$: Volumen de los tanques T601 y T602
- $V_{cisterna}$: Volumen de las cisternas de transporte
- $N_{tanques}$: número de tanques



- $N_{\text{cisternas}}$: número de cisternas

Las condiciones de operación de los tanques son 5°C y 500 kPa, así que aplicando la ley de gases ideales:

$$N = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \quad \text{Ecuación 11.11.11a}$$

$$N = \frac{500000 \cdot 33300}{8.31 \cdot 278} = 7207231 \text{ moles}$$

A partir de estos moles, se repite la ecuación de los gases ideales para encontrar el volumen que ocuparían a 15°C y 101.3 kPa:

$$V = \frac{N \cdot R \cdot T}{P} \quad \text{Ecuación 11.11.11b}$$

$$V = \frac{7207231 \cdot 8.31 \cdot 288}{101300} = 170275 \text{ m}^3$$

Con este volumen y la herramienta de cálculo proporcionada por la página de información sobre gases de la empresa Carbueros Metálicos ⁽³⁾ se calcula el volumen y cantidad de nitrógeno líquido criogénico requeridos.

Con tal de elegir un tanque con capacidad para almacenar el nitrógeno necesario, se ha repetido todo el proceso de cálculos desde la (Ecuación 11.11.10) pero para la producción de 5 días, rellenando el tanque en después de este período de tiempo.

Tabla 11.11.3. Necesidades de nitrógeno

	Necesidades cada 30 días
Volumen de nitrógeno gas (m ³)	170275
Volumen de nitrógeno líquido (L)	249793
Cantidad de nitrógeno líquido (kg)	201776
	Necesidades cada 5 días
Volumen de nitrógeno gas (m ³)	249794
Volumen de nitrógeno líquido (L)	41632
Cantidad de nitrógeno líquido (kg)	33639



Para el volumen de nitrógeno anual necesario para inertizar, se ha calculado el volumen total de todos los equipos de amas líneas, convirtiéndolo a metros cúbicos de nitrógeno líquido con la calculadora de Carburos Metálicos ⁽³⁾:

Tabla 11.11.3. Volumen de los equipos de proceso

Equipo	Volumen (m ³)
H101	0.34
H102	0.29
H103	0.67
H104	0.65
H105	0.5
H106	0.45
H107	0.46
R201	11.7
H301	1.24
W301	77.3
H302	0.05
W302	3.47
H401	0.6
S401	34.8
D501	40
H501	0.25
D502	10
Total x2 lineals	365.54
Volumen de nitrógeno líquido	536247

11.12. Seguridad

11.12.1. Cálculo de incendio

Es necesario realizar un estudio sobre las consecuencias en caso de que se produjera un incendio, para ello, se ha seguido el siguiente esquema de cálculo para la determinación de las características del incendio producido en un tanque de almacenamiento de óxido de etileno.



Para ello, se ha realizado un análisis de la variación de la radiación térmica percibida en función de la distancia al foco del fuego. Este cálculo se ha realizado mediante la ([Ecuación 11.12.1](#))

$$Q_x = Q_R \cdot \tau \cdot F_p \cdot A \quad \text{Ecuación 11.12.1}$$

Dónde:

- Q_R : calor emitido (kW/m^2)
- τ : transmisividad atmosférica
- F_p : factor de vista (m^{-2})
- A : superficie del fuego (m^2)

Para el cálculo del calor emitido, se ha utilizado la ([Ecuación 11.12.2](#))

$$Q_R = \frac{\eta \cdot m_c \cdot 2 \cdot r \cdot H_c}{4 \cdot H} \quad \text{Ecuación 11.12.2}$$

Dónde:

- η : fracción de radiación (0.35)
- m_c : velocidad de combustión ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
- r : radio del vertido (m)
- H_c : calor de combustión (kJ/kg)
- H : altura de la flama (m)

Para el cálculo de la transmisividad atmosférica se ha usado la ([Ecuación 11.12.3](#)).

$$\tau = 2.02 \cdot (P_w \cdot X)^{-0.09} \quad \text{Ecuación 11.12.3}$$

Dónde:

- P_w : presión parcial del vapor de agua (Pa)
- X : distancia entre el foco emisor y el receptor (m).



Para el cálculo del factor de vista se ha utilizado la ([Ecuación 11.12.4](#)).

$$F_p = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot X^2} \quad \text{Ecuación 11.12.4}$$

Dónde:

- X: distancia entre el foco emisor y el receptor (m).

Se ha calculado también la altura de la llama con la ([Ecuación 11.12.5](#)).

$$H = 84 \cdot r \cdot \left(\frac{m_c}{(2 \cdot g \cdot r)^{0.5} \cdot \rho_A} \right)^{0.61} \quad \text{Ecuación 11.12.5}$$

Dónde:

- r: radio del vertido (m)
- m_c : velocidad de combustión ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
- g: fuerza de la gravedad (m/s^2)
- ρ_A : densidad del aire (kg/m^3)

Dado que la temperatura de ebullición del óxido de etileno es menor que la temperatura ambiente, para calcular la velocidad de combustión se puede utilizar la ([Ecuación 11.12.6](#)).

$$m_c = \frac{0.001 \cdot H_c \cdot \pi \cdot r^2}{H_{vap}} \quad \text{Ecuación 11.12.6}$$

Dónde:

- H_c : calor de combustión (kJ/kg)
- H_{vap} : calor de vaporización (kJ/kg)
- r: radio del vertido (m)



Para el radio del vertido, se ha tomado como valor, la mitad del diámetro del cubeto de recogida de vertidos.

11.12.2. Cálculo de explosiones

Es necesario también hacer un cálculo aproximativo de las consecuencias que tendría una explosión en la planta INDOXETH5. Para ello, se ha calculado también la radiación térmica percibida y, además, la presión percibida en función de la distancia a la explosión.

Se debe seguir el siguiente esquema de cálculo:

En primer lugar, se deben calcular los kg de TNT equivalentes para recipientes a presión, a través de la (**Ecuación 11.12.7**).

$$W_{TNT} = 0.0219 \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad \text{Ecuación 11.12.7}$$

Dónde:

- P_1 : presión de estallido (atm)
- P_2 : presión atmosférica (atm)
- V_1 : volumen (m^3) de gas comprimido

Se ha realizado a continuación el cálculo de la presión en la superficie del recipiente en el momento del estallido mediante la (**Ecuación 11.12.8**).

$$P_B = P_s \cdot \left[1 - \frac{3.5 \cdot (\gamma - 1) \cdot (P_s - 1)}{[(\gamma \cdot T / M) \cdot (1 + 5.9 \cdot P_s)]^{0.5}} \right]^{-2 \cdot \gamma / (\gamma - 1)} \quad \text{Ecuación 11.12.8}$$

Con la diferencia de presión entre la atmosférica y la de superficie, se puede consultar en la (**Figura 11.12.1**) el valor de la distancia normalizada (d_n).

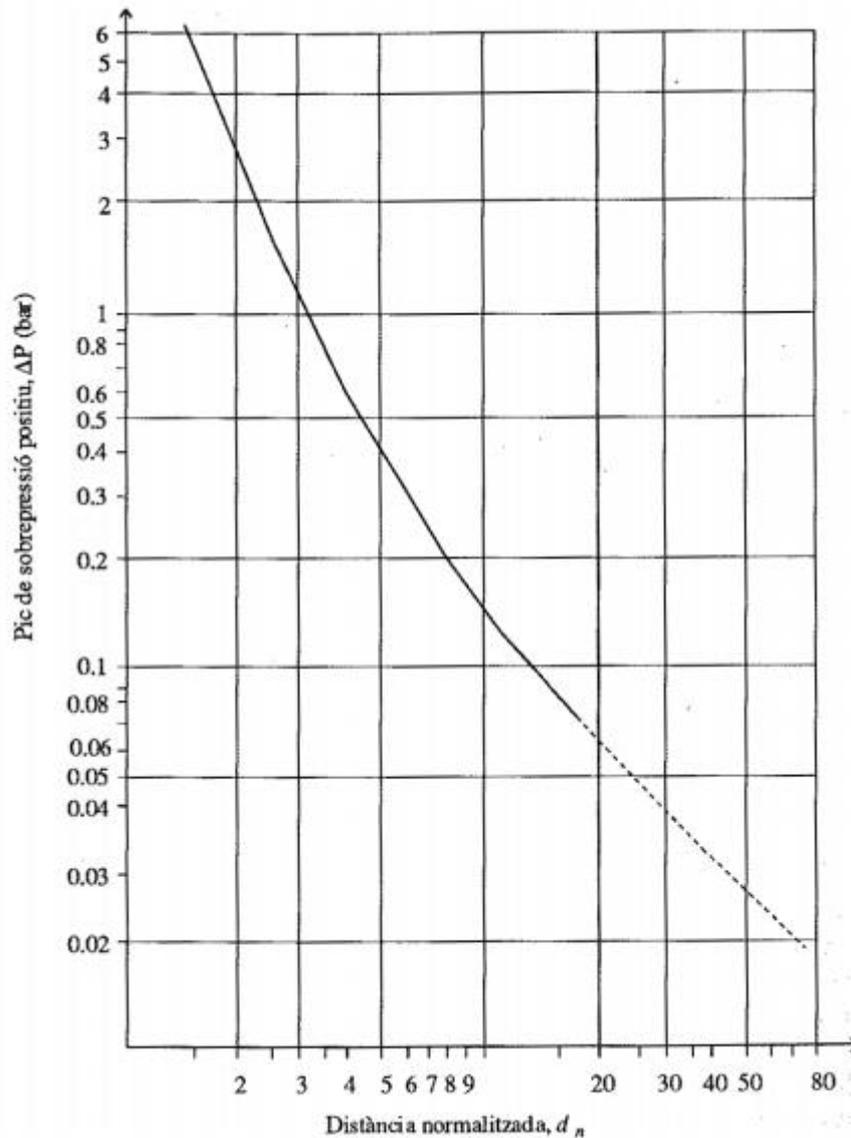


Figura 11.12.1. Gráfico del pico de sobrepresión en función de la distancia normalizada.

Con esta distancia normalizada, se puede calcular la distancia real a la que la masa de TNT equivalente calculada, produciría el incremento de presión calculado anteriormente.

Si a esta distancia real obtenida, se le resta el radio del recipiente, se obtiene la distancia virtual (d_v).

Con esta d_v , si se le suma el valor de la distancia en la que se quieren calcular los efectos de la explosión, se vuelve a consultar en la (Figura 11.12.1) la sobrepresión real obtenida a la distancia estudiada. Se puede entonces



determinar los daños producidos en las instalaciones a partir del incremento de presión producido.

De forma análoga al caso anterior de incendios, el calor recibido a una cierta distancia de la explosión, se puede calcular mediante la (**Ecuación 11.12.9**).

$$Q_x = \tau \cdot E \cdot F_{21} \quad \text{Ecuación 11.12.9}$$

Dónde:

- τ : transmisividad del aire
- E : calor emitido (kW/m²)
- F_{21} : factor de vista

La transmisividad del aire se calcula con la (**Ecuación 11.12.3**) de igual manera que para el caso de un incendio. El factor de vista se calcula de manera distinta, se puede obtener con la (**Ecuación 11.12.10**).

$$F_{21} = \frac{D_{max}^2}{4 \cdot X^2} \quad \text{Ecuación 11.12.10}$$

Dónde:

- D_{max} : diámetro máximo de bola de fuego (m)
- X : distancia al origen de la explosión (m)

El calor emitido se puede calcular con la (**Ecuación 11.12.11**).

$$E = \frac{F_{rad} \cdot m \cdot H_c}{\pi \cdot (D_{max})^2 \cdot t} \quad \text{Ecuación 11.12.11}$$

Dónde:

- F_{rad} : factor de radiación (0.25)
- m : masa (kg)
- H_c : calor de combustión (kJ/kg)



- D_{max} : diámetro máximo de bola de fuego (m)
- t : tiempo de duración de la bola de fuego (s)

Es necesario, para los cálculos anteriores, hallar primero las características de la bola de fuego formada en la explosión.

Se calcula primero el diámetro máximo de la bola de fuego con la ([Ecuación 11.12.12](#)).

$$D_{max} = 6.48 \cdot (m)^{0.325} \quad \text{Ecuación 11.12.12}$$

Dónde:

- m : masa de combustible (kg)

Se ha calculado también el diámetro inicial de la bola de fuego y su altura mediante las ([Ecuaciones 11.12.13 y 11.12.14](#)), respectivamente.

$$H = 0.75 \cdot D_{max} \quad \text{Ecuación 11.12.13}$$

$$D_{inicio} = 1.3 \cdot D_{max} \quad \text{Ecuación 11.12.14}$$

Para el tiempo de duración de la bola de fuego se ha utilizado la ([Ecuación 11.12.15](#)).

$$t = 0.825 \cdot m^{0.26} \quad \text{Ecuación 11.12.15}$$

Además de las características de la bola de fuego, se ha querido determinar también las consecuencias de la rotura del tanque de almacenaje.

En primer lugar, se ha calculado el número de fragmentos que podrían resultar del estallido del recipiente. Dado que este cálculo es aplicable a recipientes con volumen superior a 700 m^3 , se ha realizado sustituyendo el volumen por 700 a modo de aproximación. Se ha utilizado la ([Ecuación 11.12.16](#)).



$$N = -3.77 + 0.0096 \cdot V$$

Ecuación 11.12.16

Dónde:

- V: volumen del tanque (m³) (se ha usado V=700)

Con el número de fragmentos conocido, se ha realizado la aproximación de dividir el peso total del tanque entre el número de fragmentos para obtener el peso de cada fragmento.

Se ha hecho también la aproximación de dividir el área total del recipiente entre el número de fragmentos para obtener así la medida de los fragmentos resultantes de la explosión. Éstos se han supuesto como fragmentos esféricos y se ha calculado el radio de cada fragmento.

Con estos datos ha sido posible realizar el cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con la (**Ecuación 11.12.17**).

$$u = 2.05 \cdot \left(\frac{P \cdot D^3}{W} \right)^{1/2}$$

Ecuación 11.12.17

Dónde:

- U: velocidad inicial (ft/s)
- P: presión de rotura (psig)
- D: diámetro de fragmento (in)
- W: peso del fragmento (lb)

A partir de estos datos, se puede calcular la distancia que recorrerán los fragmentos del tanque debido a la explosión del mismo. Para ello, es necesario calcular un factor que viene dado por la (**Ecuación 11.12.18**).

$$eje\ x = \frac{\rho_{aire} \cdot C_D \cdot A_D \cdot u^2}{M \cdot g}$$

Ecuación 11.12.18

Dónde:

- C_D : coeficiente de fragmento (0.47)
- A_D : área de fragmento (m^2)
- u : velocidad inicial de los fragmentos (m/s)
- M : masa de fragmento (kg)
- G : fuerza de la gravedad (m/s^2)

Este factor calculado permite leer en la (Figura 11.12.2) el valor del eje y.

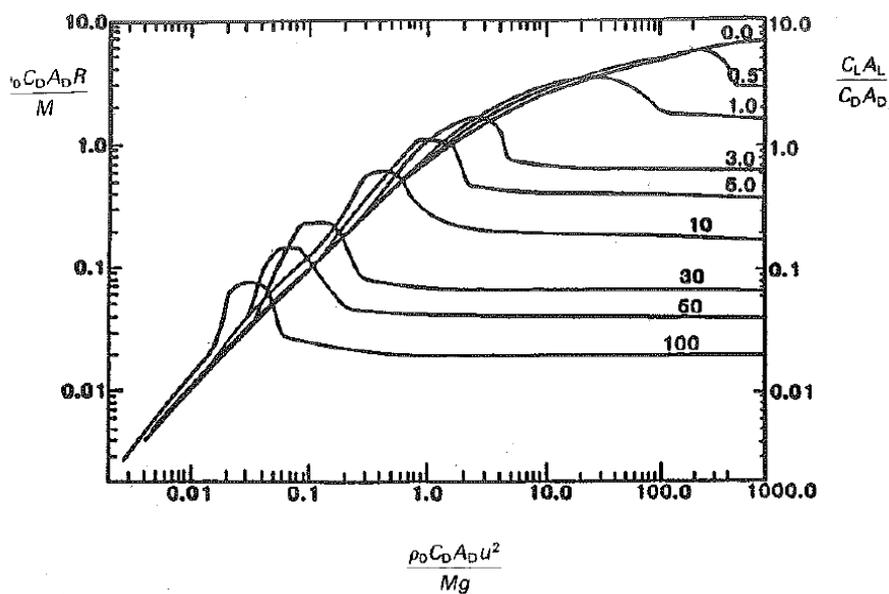


Figura 11.12.2. Gráfico para calcular la distancia recorrida de los fragmentos

Leyendo el eje y de este gráfico, se puede obtener la distancia recorrida por los fragmentos (r) si se aísla esta variable en la (Ecuación 11.12.19).

$$\text{eje } y = \frac{\rho_{\text{aire}} \cdot C_D \cdot A_D \cdot r}{M} \quad \text{Ecuación 11.12.19}$$

Además, se ha calculado la distancia de seguridad de la explosión con la (Ecuación 11.12.20).

$$\text{fafety distance} = 120 \cdot (W_{TNT})^{1/3} \quad \text{Ecuación 11.12.20}$$



11.13. Medio ambiente

Para el correcto estudio de impacto ambiental de la planta INDOXETH5, ha sido necesario hacer el cálculo de emisiones atmosféricas y el de la DQO de los vertidos acuosos.

Emisiones atmosféricas

Dado que la corriente de residuos gaseosos de la planta se someterá a incineración, se ha calculado el total de CO₂ emitido a la atmosfera con las (**Ecuaciones 11.13.1 y 11.13.2**).

$$CO_{2\ eq} = n_i \cdot \text{coeficiente estequiométrico de combustión} \quad \text{Ecuación 11.13.1}$$

Dónde:

- CO_{2 eq}: caudal molar de CO₂ generado en la combustión.
- n_i: caudal molar del compuesto i.

Con el caudal molar de CO₂ equivalente obtenido para cada compuesto, se han sumado y se ha aplicado la (**Ecuación 11.13.2**) para obtener el total de kg emitidos anualmente.

$$\frac{kg\ CO_2}{año} = \frac{kmol\ CO_2}{h} \cdot \frac{44.05\ kg}{kmol} \cdot \frac{24h}{1\ día} \cdot \frac{335\ días}{1\ año} \quad \text{Ecuación 11.13.2}$$

Se recoge en la (**Tabla 11.13.1**) los resultados de los cálculos anteriores.



Tabla 11.13.1. Valores obtenidos en el cálculo de las emisiones de CO₂.

	Etileno	Óxido de etileno	Dióxido de carbono
kmol/h emitidos	1.6582	28.1095	121.57
kmol/h CO ₂ equivalente	3.3164	56.219	121.57
kg/h CO ₂ equivalente	145.9216	2473.636	5349.08
kg/h CO ₂ 1 línea		7968.6376	
kg/h CO ₂ total		15937.2752	
kg/año CO ₂ total		128135692.6	
tn/año CO ₂ total		128135.6926	

Vertidos acuosos

Es necesario conocer la demanda química de oxígeno de las aguas vertidas, pues si el valor de DQO es muy elevado, es necesario tratar las aguas antes de ser vertidas. Para el cálculo de la DQO se han utilizado las (Ecuaciones 11.13.3 y 11.13.4).

$$\frac{kg O_2}{h} = \frac{kmol OE}{h} \cdot \frac{2.5 kmol O_2}{kmol OE} \cdot \frac{32 kg O_2}{kmol O_2} \quad \text{Ecuación 11.13.3}$$

$$DQO = \frac{kg O_2}{h} \cdot \frac{1000000 mg}{1 kg} \cdot \frac{volumen vertido (l)}{h} \quad \text{Ecuación 11.13.4}$$

Se recoge en la (Tabla 11.13.2) los valores obtenidos de los cálculos anteriores.

Tabla 11.13.2. Valores obtenidos en el cálculo de la DQO.

	D501a/b	D502a/b
kmol OE/h	0.0014	1.5745
kmol/h O ₂ equivalente	0.0035	3.93625
kg/h O ₂ equivalente	0.112	125.96
Volumen vertido (l/h)	360750.43	1460730
Total O ₂ kg/h		126.072
Total O ₂ mg/h		126072000
DQO (mg/l)		69.214



11.14. Evaluación económica

11.14.1. Costes de equipos

Para una correcta evaluación y estimación económica de la planta INDOXETH5 y su viabilidad se han calculado los costes de los equipos y maquinaria a partir del método algorítmico de Sinnott y Towler y el apéndice C de Couper. Este método se utilizan diferentes algoritmos a partir de algunos datos característicos de los equipos para poder calcular aproximadamente su coste. Todos los algoritmos están en unidades del sistema métrico americano, por lo tanto, en todos los casos hará falta convertir los datos con que trabaja INDOXETH5, que están en unidades del Sistema Internacional (SI) a unidades del sistema métrico americano. Además, dichas correlaciones están hechas a partir de los valores monetarios de 2003, se deberá hacer la conversión al valor monetario actual ⁽⁴⁾, 2018 será el considerado como correcto. El indicador económico de 2003 corresponde a 395.6 y el del 2018 corresponde a 603.1.

Por último, se debe tener en cuenta el coste de la instalación de dichos equipos, por lo tanto, se deberá multiplicar el valor final del coste de los equipos por el multiplicador del coste de su instalación. Además, dicho coste final será en dólares (\$), por lo tanto, se deberá pasar a euros (€) multiplicando el valor por 0.9, ya que 1 dólar = 0.9 euro.

En este apartado solo se expondrán los algoritmos usados, los resultados de dichos algoritmos se encuentran en el (**Volumen 7. Evaluación Económica**).

11.14.1.1. Reactores

El cálculo del coste del reactor se basará en los algoritmos de los costes de un reactor y el coste de un intercambiador de calor, ya que el reactor de INDOXETH5 consta de una refrigeración muy potente y trabaja como un intercambiador de carcasa y tubos con una reacción en el interior de los tubos. Por lo tanto, se han usado los siguientes algoritmos:



Reactor vertical:

$$C = F_M * C_b + C_a \text{ en \$} \quad \text{Ecuación 11.14.1}$$

Dónde cada parámetro corresponde a:

$$C_b = 1.218 * e^{[9.1 - 0.2889 * \ln(W) + 0.04576 * \ln(W)^2]} \quad \text{donde } 5000 < W < 226000 \text{ lb}$$

$$C_a = 300 * D^{0.7396} * L^{0.7066} \quad \text{donde } 6 < D < 10 \text{ ft y } 12 < L < 20 \text{ ft}$$

! F_M depende del material, en este caso acero inoxidable 316L, por lo tanto, $F_M = 2.1$.

Intercambiador:

De tubos y carcasa:

$$C = 1.218 * f_d * f_m * f_p * C_b \text{ en \$} \quad \text{Ecuación 11.14.2}$$

Donde:

$$C_b = e^{[8.821 - 0.30863 * \ln(A) + 0.0681 * (\ln(A))^2]} \quad \text{donde } 150 < A < 12000 \text{ ft}^2$$

Y f_d , f_p y f_m dependen del tipo de carcasa, del rango de presiones y del material, quedado:

$$f_d = e^{[-1.1156 + 0.0906 * \ln(A)]}$$

$$f_p = 0.7771 + 0.04981 * \ln(A)$$

$$f_m = g_1 + g_2 * \ln(A) \quad \text{donde } g_1 = 0.8603 \text{ y } g_2 = 0.23296$$

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de los reactores. El coste de su instalación es 1.6.

11.14.1.2. Absorbedores

El cálculo del coste de los absorbedores se hará a partir de los algoritmos de una torre de absorción, que usa la misma fórmula que la torre de destilación, pero con diferentes parámetros. Todo y eso, debido a que una columna es de



platos y otra empacada, se usarán algoritmos diferentes. Por lo tanto, los algoritmos de los absorbedores empacados (W302) serán:

$$C = 1.218 * [f_1 * C_b + V_p * C_p + C_{pt}] \text{ en } \$ \quad \text{Ecuación 11.14.3a}$$

Donde:

$f_1=2.1$ depende del material, en este caso, acero inoxidable 316L

$C_p= 28$ depende del tipo de empacamiento en este caso, Pall Rings de metal

V_p = Volumen de empacamiento

$C_b = 1.218 * e^{[6.629+0.1826*\ln(W)+0.02297*\ln(W)^2]}$ donde $4250 < W < 980000$ lb shell

$C_{pt} = 300 * D^{0.7396} * L^{0.7068}$ donde $3 < D < 21$ ft y $27 < L < 40$ ft diámetro plataforma y longitud de los lados

Los algoritmos de los absorbedores de platos (W301) serán:

$$C_t = 1.218 * [f_1 * C_b + N * f_2 * f_3 * f_4 * C_b + C_{pt}] \text{ en } \$ \quad \text{Ecuación 11.14.3b}$$

Donde:

N = número de platos

$f_1=2.1$ depende del material, en este caso, acero inoxidable 316L

$f_2 = 1.401 + 0.0724 * D$ depende del material, en este caso, acero inoxidable 316L

$f_3=1$ depende del tipo de platos

$$f_4 = \frac{2.25}{1.0414^N}$$

$C_b = 1.218 * e^{[6.629+0.1826*\ln(W)+0.02297*\ln(W)^2]}$ donde $4250 < W < 980000$ lb shell

$C_{pt} = 300 * D^{0.7396} * L^{0.7068}$ donde $3 < D < 21$ ft y $27 < L < 40$ ft diámetro plataforma y longitud de los lados

$C_t = 457.7 * e^{0.1739*D}$ donde $2 < D < 16$ ft diámetro del plato



A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de los absorbedores. El coste de su instalación es 2.1.

11.14.1.3.Separadores

El cálculo del coste de los separadores se hará a partir de los algoritmos de un separador mecánico. El algoritmo depende de si el proceso es orgánico o inorgánico, debido a que todos los componentes del proceso son orgánicos, se estima como proceso orgánico. Por lo tanto, los algoritmos de los separadores serán:

$$C = 1.218 * [a + b * W] \text{ en K\$} \quad \text{Ecuación 11.14.4}$$

Donde:

a=98 depende del material, en este caso, acero inoxidable 316L

b=5.06 depende del material, en este caso, acero inoxidable 316L

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de los separadores. El coste de su instalación es 2.1.

11.14.1.4.Destiladores

El cálculo del coste de los destiladores se hará a partir de los algoritmos de una torre de destilación, que usa la misma fórmula que la torre de absorción, pero con diferentes parámetros. Por lo tanto, los algoritmos de los destiladores serán:

$$C = 1.218 * [f_1 * C_b + V_p * C_p + C_{pt}] \text{ en \$} \quad \text{Ecuación 11.14.5}$$

Donde:

f₁=2.1 depende del material, en este caso, acero inoxidable 316L



$C_p = 28$ depende del tipo de empacamiento en este caso, Pall Rings de metal

V_p = Volumen de empacamiento

$C_b = 1.218 * e^{[7.123+0.1478*\ln(W)+0.02488*\ln(W)^2+0.01580*\left(\frac{L}{D}\right)*\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)]}$ donde $9020 < W < 2470000$ lb T1= espesor tapas T2= espesor cuerpo

$C_{pt} = 249.6 * D^{0.6332} * L^{0.6016}$ donde $2 < D < 24$ ft y $57 < L < 170$ ft diámetro plataforma y longitud de los lados

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de los destiladores. El coste de su instalación es 2.1.

11.14.1.5. Tanques de almacenamiento

El cálculo del coste de los tanques de almacenamiento se hará a partir de los algoritmos de los tanques de almacenamiento fabricados por empresas. Por lo tanto, los algoritmos de los tanques de almacenamiento serán:

$$C = 1.218 * F_M * e^{[2.631+1.3673*\ln(V)-0.06309*\ln(V)^2]} \text{ en } \$ \quad \text{Ecuación 11.14.6}$$

donde $1300 < V < 21000$ gal y $F_m=2.7$ ya que depende del material, en este caso, acero inoxidable 316L.

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de los tanques de almacenamiento. El coste de su instalación es 1.8.

11.14.1.6. Intercambiadores de calor

El cálculo del coste de los intercambiadores de calor se hará a partir de los algoritmos de los intercambiadores de calor de tubos y carcasa, algoritmos ya usados para el cálculo del coste del reactor. Por lo tanto, los algoritmos de los intercambiadores de calor serán:



De tubos y carcasa:

$$C = 1.218 * f_d * f_m * f_p * C_b \text{ en } \$ \quad \text{Ecuación 11.14.2}$$

Donde:

$$C_b = e^{[8.821 - 0.30863 * \ln(A) + 0.0681 * (\ln(A)^2)]} \text{ donde } 150 < A < 12000 \text{ ft}^2$$

Y f_d , f_p y f_m dependen del tipo de carcasa, del rango de presiones y del material, quedando:

$$f_d = e^{[-1.1156 + 0.0906 * \ln(A)]}$$

$$f_p = 0.7771 + 0.04981 * \ln(A)$$

$$f_m = g_1 + g_2 * \ln(A) \text{ donde } g_1 = 0.8603 \text{ y } g_2 = 0.23296$$

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de los intercambiadores de calor. El coste de su instalación es 2.2.

11.14.1.7. Compresores y Bombas

Compresores

El cálculo del coste de los compresores se hará a partir de los algoritmos de los compresores centrífugos. Por lo tanto, los algoritmos de los compresores serán:

$$C = 7.90 * HP^{0.62} \text{ en K\$} \quad \text{Ecuación 11.14.7}$$

Donde $200 < HP < 30000$

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de los compresores. El coste de su instalación es 1.5.

Bombas

El cálculo del coste de las bombas se hará a partir del método de correlaciones para bombas centrífugas. Por lo tanto, los algoritmos de las bombas serán:



$$C = a + b * S^n \text{ en } \$$$

Ecuación 11.14.8

Donde:

$$a=6900$$

$$b= 206$$

$$n=0.9$$

S=caudal en L/s

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de las bombas. El coste de su instalación es 2.

11.14.1.8. Chiller

El cálculo del coste del chiller se hará a partir de los algoritmos de las torres de refrigeración. Por lo tanto, los algoritmos de las torres de refrigeración serán:

$$C = 178 * F * Q^{0.61} \text{ en } K\$$$

Ecuación 11.14.9

Donde:

F= 4 depende de la variación del chiller.

$$0.5 < Q < 400 \text{ M BTU/h}$$

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de las torres de refrigeración. El coste de su instalación es 1.2.

11.14.1.9. Turbina

El cálculo del coste de las turbinas se hará a partir de los algoritmos de las turbinas y compresores sin vacío. Por lo tanto, los algoritmos de las turbinas serán:



$$C = 0.378 * HP^{0.61} \text{ en K\$}$$

Ecuación 11.14.10

Donde $20 < HP < 5000$

A partir de estos algoritmos, y substituyendo las características de los equipos necesarias en dichos algoritmos, se obtienen los costes de la turbina. El coste de su instalación es 1.5.

11.14.2. Amortización

La amortización es el coste asociado a la pérdida del inmovilizado. En el caso de INDOXETH5 se ha supuesto una amortización siguiendo el método de suma de dígitos, que servirá para el cálculo del Net Cash Flow (NCF).

Para calcular la amortización siguiendo dicho método se debe calcular un parámetro z , obteniendo un valor de 120:

$$z = \frac{(t+1)*t}{t}$$

Ecuación 11.14.11

Donde t es el tiempo que dura el proyecto, en este caso 15 años. A partir de este parámetro, se puede calcular la amortización de cada año a partir de la siguiente ecuación.

$$A_j = \frac{I*(t-(j-1))}{z}$$

Ecuación 11.14.12

Donde A_j es la amortización en un año en concreto j . Por lo tanto, j es el año en el que se quiere calcular la amortización dentro de los 15 años de duración del proyecto.

Seguendo los pasos explicados anteriormente se consigue los siguientes valores de amortización en función de cada año:



Tabla 11.14.1. Valores de amortización en función del año.

Año	Amortización
0	0
1	-16.4
2	-15.3
3	-14.3
4	-13.2
5	-12.1
6	-11.0
7	-9.9
8	-8.8
9	-7.7
10	-6.6
11	-5.5
12	-4.4
13	-3.3
14	-2.2
15	-1.1



11.15. Bibliografía

- ⁽¹⁾ *Rules of Thumb for chemical engineering*. C. BRANAN. 3^a Edición
- ⁽²⁾ Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial. AFELMA Y ANDIMAI.
<https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2017/01/Guia-de-Buenas-Practicas-en-el-Aislamiento-Industrial-fenercom-2017.pdf>
- ⁽³⁾ Calculadora de nitrógeno líquido: Carburos Metálicos
https://infogases.com/nitrogeno#principales_aplicaciones
- ⁽⁴⁾ Indicadores económicos anuales: Economics Indicators CEPCI at
www.chemengonline.com/pci