

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CLORURO DE VINILO



Universitat Autònoma de Barcelona

ESCOLA D'ENGINYERIA

Proyecto de Final de Grado

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

Tutor: Marc Peris

Luis Enrique Brenes

David Gómez

Bàrbara Tobella

Adrián Ruiz

Matías Llorca

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CLORURO DE VINILO

Capítulo 11.

Manual de cálculos



CAPÍTULO 11. MANUAL DE CÁLCULOS

| | |
|--|----|
| 11. MANUAL DE CÁLCULOS | 3 |
| 11.1. DISEÑO DE LOS REACTORES | 3 |
| 11.1.1. Ecuación de diseño | 5 |
| 11.1.2. Cinética de la reacción..... | 5 |
| 11.1.3. Ecuación de Ergun | 6 |
| 11.1.4. Reactivos y productos en fase gas..... | 8 |
| 11.1.5. Determinación de las propiedades del fluido de proceso..... | 9 |
| 11.1.6. Resultados | 14 |
| 11.1.7. Sobredimensionamiento del reactor | 17 |
| 11.1.8. Intercambio de calor | 18 |
| 11.1.9 Diseño cabezales | 27 |
| 11.1.10 Peso del equipo | 27 |
| 11.2. DISEÑO INTERCAMBIADORES DE CALOR | 30 |
| 11.2.1 Aspectos a tener en cuenta en el diseño de los intercambiadores | 30 |
| 11.2.2 Diseño con ASPEN EXCHANGER DESIGN AND RATING V 8.4 | 34 |
| 11.3 DISEÑO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO / PULMÓN..... | 40 |
| 11.3.1 Diseño mecánico | 41 |
| 11.3.2 Tanque pulmón Cloruro de Hidrógeno (T-202) | 47 |
| 11.3.3 Tanque pulmón Acetileno (T-201)..... | 50 |
| 11.3.4 Tanque almacenamiento condensado columna DC-401 (T-401)..... | 52 |
| 11.3.5 Tanque pulmón entre las dos columnas (T-402)..... | 55 |
| 11.3.6 Tanque almacenamiento condensado columna DC-501 (T-501)..... | 57 |
| 11.3.7 Tanque almacenaje corriente M05 (T-602 A / B)..... | 60 |
| 11.3.8 Tanque almacenaje producto (T-601 A / B) | 63 |
| 11.3.9 Silo para el carbón activo y el catalizador | 69 |
| 11.4 DISEÑO COLUMNAS DE DESTILACIÓN | 71 |
| 11.4.1 Diseño teórico | 71 |
| 11.4.2 Tipo de columna y diseño interno | 73 |
| 11.5. DISEÑO DE TUBERÍAS | 79 |
| 11.5.1 Cálculo del diámetro nominal | 79 |
| 11.10.2 Espesor del aislante | 81 |
| 11.6. DISEÑO DE BOMBAS Y COMPRESORES | 82 |
| 11.6.1 Diseño de las bombas..... | 82 |
| 11.6.2 Diseño de los compresores | 86 |

| | |
|-------------------------|----|
| 11.7 BIBLIOGRAFIA | 88 |
|-------------------------|----|

11. MANUAL DE CÁLCULOS

11.1. DISEÑO DE LOS REACTORES

El cloruro de vinilo se produce a partir de la reacción equimolar de cloruro de hidrógeno y acetileno. Esta reacción es exotérmica y está catalizada por cloruro de mercurio (II), el cual se encuentra en el reactor impregnado en un lecho fijo de carbón activo, que es un compuesto inerte. Tanto productos como reactivos se encuentran en fase gas. Sin embargo, no se trata de una reacción homogénea ya que la reacción consta de 5 etapas, entre las cuales están la adsorción del acetileno y cloruro de hidrógeno en el cloruro de mercurio (II), formando intermedios de reacción en fase sólida. Las 5 etapas de reacción están descritas en la **Figura 11-1**. Las 4 primeras etapas son reversibles, mientras que la última es fuertemente irreversible.

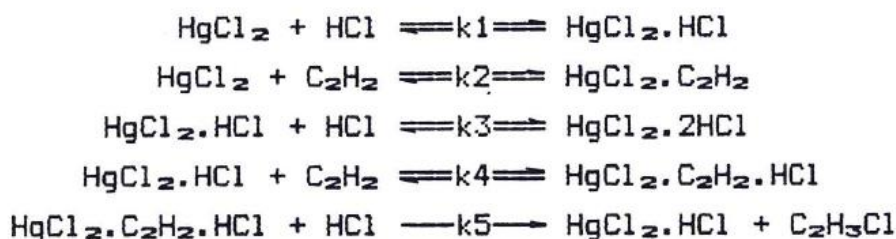


Figura 11-1 Etapas de la reacción de cloración del cloruro de vinilo

El reactor diseñado consiste en un reactor isoterma de flujo de pistón tubular. Por el interior de dichos tubos circulará el fluido de proceso. Puesto que la reacción es exotérmica, para mantener el interior de los tubos a una temperatura constante, y poder así considerar el reactor isoterma, por el exterior de los tubos circulará un fluido refrigerante que pueda absorber la energía liberada por la reacción. Dicho refrigerante se trata de agua en su punto de burbuja a presión atmosférica, es decir, se empleará la energía transferida desde el interior de los tubos para su cambio de fase de líquido a gas.

Se ha escogido este tipo de reactor ya que para reacciones catalizadas en fase gas, un modelo de reactor muy común es el de flujo de pistón tubular con un lecho fijo que se acaba de explicar. Un ejemplo de este tipo de reactor se encuentra en la **Figura 11-2** mostrada a continuación (1). La razón por la que el reactor es tubular es para aumentar la superficie de enfriamiento y así evitar, o por lo menos reducir, el problema de las zonas calientes en el interior del reactor (2). Es importante resolver el problema de las zonas calientes en el interior del reactor para asegurar la isothermicidad del reactor. Además, este problema puede causar la sublimación del cloruro de mercurio (II).

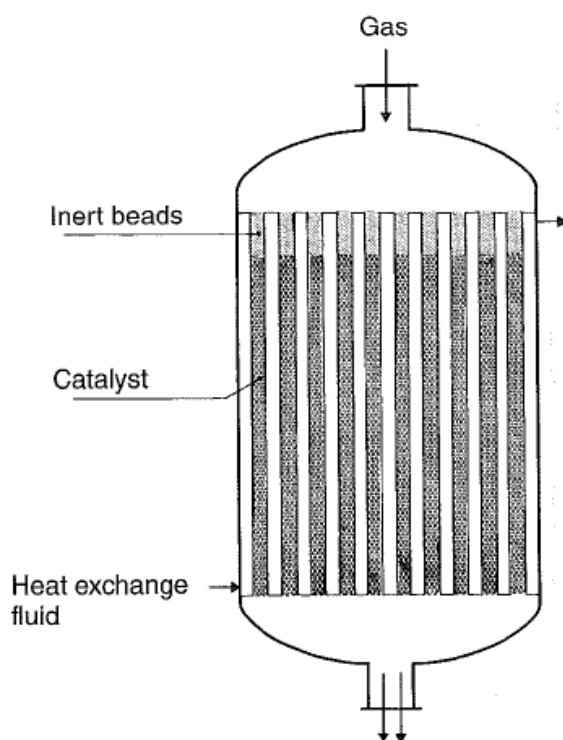


Figura 11-2 Reactor de flujo pistón multitubular

Se ha decidido introducir el alimento al reactor a unas condiciones de 118 °C y 152 kPa. La temperatura se ha seleccionado teniendo en cuenta que por debajo de 120 °C la sublimación del catalizador es prácticamente inexistente. Sin embargo, se ha escogido una temperatura tan cercana a 120 °C para maximizar la conversión y minimizar el volumen del reactor. Por su parte, la presión escogida es superior a 1 atm, debido a que el fluido experimentará una caída de presión a lo largo del reactor.

11.1.1. Ecuación de diseño

El reactor es catalítico e isoterma, por lo cual la ecuación de diseño se basa en una ecuación diferencial a partir de la cual se podrá prever la evolución de la conversión a lo largo de la masa de catalizador (3). Esta ecuación se expresa a continuación.

$$-r' = F_{He} \frac{dX}{dW} \quad [\text{mol/kg de catalizador s}] \quad (11-1)$$

Donde:

- r' : velocidad de la reacción catalizada en [mol/kg de catalizador s].
- X : conversión.
- W : masa de catalizador en [kg].
- F_{He} : caudal molar del reactivo limitante en [mol/s]. En este caso es el cloruro de hidrógeno, pues a pesar de que se introducen los reactivos en proporción equimolar, la reacción del subproducto (1,2-dicloroetano) consume 2 moles de cloruro de hidrógeno por cada mol de acetileno. Por lo tanto, la corriente recirculada desde la última columna de destilación al reactor tiene una composición mayor en acetileno.

11.1.2. Cinética de la reacción

El modelo cinético de la reacción ha sido previamente estudiado para diferentes tipos de reactores y condiciones de trabajo (4). Por lo tanto, los datos para el cálculo de las constantes cinéticas de este trabajo se han basado en un modelo extrapolable a un reactor continuo de flujo de pistón a temperaturas de entre 100 y 135 °C.

Los valores de este modelo para el cálculo de las constantes cinéticas están descritos a continuación, en la **Tabla 11-1**.

Tabla 11-1. Valores para el cálculo del modelo cinético

| i | A_i | E_i |
|-----|-------|-------|
| r | 15,71 | 11,2 |
| H | -1,05 | 1,87 |
| A | -1,63 | 0 |
| V | -2,7 | 3,2 |

Por lo tanto, las ecuaciones para el cálculo de las constantes cinéticas quedan de la siguiente manera:

$$k_r = \exp(A_r - E_r/RT)/3,6 \quad [\text{mol/kg s}] \quad (11-2)$$

$$k_H = \exp(A_H + E_H/RT)/101.325 \quad [1/\text{Pa}] \quad (11-3)$$

$$k_A = \exp(A_A + E_A/RT)/101.325 \quad [1/\text{Pa}] \quad (11-4)$$

$$k_V = \exp(A_V + E_v/RT)/101.325 \quad [1/\text{Pa}] \quad (11-5)$$

Donde:

- T: temperatura en el interior del reactor en [K].
- R: constante de los gases ideales es 8,31 en [m³/mol K].

La ecuación cinética propuesta por este modelo cinético está descrita a continuación.

$$r' = \frac{k_r K_H K_A p_H p_A}{(1 + K_H p_H + K_v p_v) (1 + K_A p_A)} \quad [\text{mol/kg s}] \quad (11-6)$$

Donde:

- p_H, p_A y p_v: presiones parciales en [Pa] de cada uno de los compuestos que intervienen en la reacción: cloruro de hidrógeno, acetileno y cloruro de mercurio (II), respectivamente.

11.1.3. Ecuación de Ergun

El catalizador está impregnado en un lecho de carbón activo, por lo que el fluido de proceso experimentará una caída de presión al circular a través de este. Esta caída de presión es calculada a partir de la ecuación de Ergun (5) presentada en la **Ecuación 11-7**.

$$\frac{dP}{dW'} = \frac{-\alpha T P_E^2}{2 T_E P} (1 - \varepsilon X) \quad [\text{Pa/kg}] \quad (11-7)$$

Donde:

- P: presión en el interior del reactor en [Pa].
- W': masa del lecho en [kg].
- P_E: presión de entrada al reactor en [Pa].
- T_E: temperatura de entrada al reactor en [K].
- ε: relación molar entre los moles del reactivo limitante y los moles de totales de reactivo y producto, ambos en la entrada.

Al tratarse de un reactor isoterma, los términos de temperatura pueden despejarse, pues esta es constante a lo largo del reactor. También hay que tener en cuenta que esta ecuación diferencial estudia la variación de la presión a lo largo de la masa del lecho, que no está formado solo de catalizador, sino que su composición está formada por un 90 % de carbón activo y un 10 % de cloruro de mercurio (II). Por lo tanto, la masa del lecho se puede aproximar de la siguiente manera: W'=10 W. Teniendo en cuenta las dos consideraciones mencionadas, la ecuación resultaría de la siguiente manera.

$$\frac{dP}{dW} = \frac{-10 \alpha P_E^2}{2 P} (1 - \varepsilon X) \quad [\text{Pa/kg}] \quad (11-8)$$

$$\alpha = \frac{2 \beta_0}{A \rho_p (1 - \theta) P_E} \quad (11-9)$$

$$\beta_0 = \frac{G (1 - \theta)}{\rho_E D_p \theta^3} \left(\frac{150 (1 - \theta) \mu}{D_p} + 1,75 G \right) \quad (11-10)$$

$$G = \rho \frac{Q}{A} \quad [\text{kg/m}^2 \text{ s}] \quad (11-11)$$

$$\varepsilon = \frac{F_{HE}}{F_{HE} + F_{AE} + F_{VE}} \quad (11-12)$$

Donde:

- A: sección de paso en $[\text{m}^2]$.
- ρ_p : densidad de partícula en $[\text{kg/m}^3]$.
- θ : porosidad de la partícula de catalizador.
- D_p : diámetro de la partícula en $[\text{m}]$.
- G: densidad de flujo másico en $[\text{kg/m}^2 \text{ s}]$.
- ρ : densidad del fluido de proceso en $[\text{kg/m}^3]$.
- Q: caudal volumétrico en $[\text{m}^3/\text{s}]$.

Por lo que al catalizador respecta, se ha decidido usar una partícula esférica de 1 mm de diámetro. La porosidad usada ha sido encontrada bibliográficamente con un valor de 0,4. La densidad de este se ha calculado mediante la media teniendo en cuenta la proporción de cada componente del lecho. Los resultados se muestran en la **Tabla 11-2**.

Tabla 11-2. Densidad de la partícula de catalizador

| | |
|---|-------|
| ρ del carbón activo $[\text{kg/m}^3]$ (90 %) | 450 |
| ρ del cloruro de hidrógeno $[\text{kg/m}^3]$ (10 %) | 5430 |
| $\rho_p [\text{kg/m}^3]$ | 948,0 |

En cuanto a la sección de paso del fluido de proceso total del reactor, se ha usado la fórmula del área de una circunferencia ya que la forma del reactor es cilíndrica, como se muestra debajo. Se ha seleccionado un valor de diámetro del reactor de 1,58 m.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 1,58^2}{4} = 1,96 \text{ m}^2 \quad (11-13)$$

11.1.4. Reactivos y productos en fase gas

Tal y como se ha mencionado anteriormente, tanto reactivos como productos están en fase gas. Es decir, suponiendo un comportamiento ideal de los gases que intervienen en la reacción, tanto las concentraciones como el caudal volumétrico y los caudales molares de cada componente a lo largo del reactor, no solo dependerán de la conversión, sino que también serán función de la variación de presión y temperatura. En este caso, como es isoterma, solo de la presión.

Las ecuaciones de las concentraciones de cada uno de los compuestos que participan en la reacción son las siguientes. Como se ha comentado anteriormente, el reactivo limitante es el cloruro de hidrógeno.

$$C_H = \frac{C_{HE} (1 - X) P}{(1 - \varepsilon X) P_E} \quad [\text{mol/m}^3] \quad (11-14)$$

$$C_A = \frac{C_{HE} \left(\frac{F_{AE}}{F_{HE}} - X \right) P}{(1 - \varepsilon X) P_E} \quad [\text{mol/m}^3] \quad (11-15)$$

$$C_V = \frac{C_{HE} \left(\frac{F_{VE}}{F_{HE}} + X \right) P}{(1 - \varepsilon X) P_E} \quad [\text{mol/m}^3] \quad (11-16)$$

$$C_{HE} = \frac{y_{AE} P_E}{R T} \quad [\text{mol/m}^3] \quad (11-17)$$

$$y_{AE} = \frac{F_{HE}}{F_{HE} F_{AE} F_{VE}} \quad (11-18)$$

Sin embargo, la ecuación cinética descrita es función de las presiones parciales de los diferentes compuestos. Estas se relacionan con las concentraciones a partir de la siguiente ecuación, deducida a partir de la ecuación general de los gases ideales.

$$p_i = C_i R T \quad [\text{Pa}] \quad (11-19)$$

Al igual que las composiciones, el caudal volumétrico también tiene su propia ecuación para reactores de flujo de pistón con fluidos de proceso en fase gas.

$$Q = Q_E \left(\frac{P_E}{P} \right) (1 - \varepsilon X) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (11-20)$$

$$Q_E = \frac{F_{HE}}{C_{HE}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (11-21)$$

11.1.5. Determinación de las propiedades del fluido de proceso

El fluido de proceso está formado por los reactivos cloruro de hidrógeno y acetileno, el producto cloruro de vinilo, el subproducto 1,2-dicloroetano y el inerte dibromometano. Por lo tanto, para calcular las propiedades del fluido que o ya se han necesitado, o se van a necesitar en el diseño del intercambiador de calor (viscosidad, densidad, calor específico y conductividad térmica), se ha decidido buscar las correlaciones correspondientes para cada propiedad.

11.1.5.1. Determinación de la viscosidad

Primeramente, se ha calculado la viscosidad individual de cada uno de los compuestos. Para todos ellos se han usado correlaciones aplicables a gases a baja presión.

1. Cloruro de Hidrógeno

Se ha usado la correlación de Chapman-Enskog. Esta ecuación es la descrita a continuación.

$$\mu = 0,002669 \frac{\sqrt{T M}}{\sigma^2 \Omega_v} \quad [\text{cP}] \quad (11-22)$$

Donde:

- M: Peso molecular [g/mol].
- σ : Diámetro de colisión [Å].
- Ω_v : Integral de colisión.

Se han encontrado los valores de los parámetros σ y ϵ/K tabulados en tablas específicas para gases polares. Mediante estos valores se ha podido encontrar el valor de Ω_v debido a que la integral de colisión es función de los dos primeros parámetros y de la temperatura.

Los valores de tanto los parámetros como el resultado final de la viscosidad se encuentran en la siguiente **Tabla 11-3**:

Tabla 11-3. Viscosidad del cloruro de hidrógeno y parámetros para su cálculo

| | |
|----------------------------|---------|
| μ_i [cP] | 0.02055 |
| T [K] | 391 |
| M_i [kg/m ³] | 36.46 |
| σ [Å] | 3.36 |
| Ω_v | 1.37 |
| ϵ/K | 328 |

2. Acetileno

La viscosidad del acetileno también se ha calculado mediante la correlación. Esta vez, sin embargo, se ha usado los parámetros para gases apolares. En este caso la integral de colisión depende de ϵ/K y δ (parámetro adimensional de polaridad).

Los valores de tanto los parámetros como el resultado final de la viscosidad se encuentran en la siguiente **Tabla 11-4**:

Tabla 11-4. Viscosidad del acetileno y parámetros para su cálculo

| | |
|----------------------------|---------|
| μ_i [cP] | 0.01322 |
| T [K] | 391 |
| M_i [kg/m ³] | 26.04 |
| σ [Å] | 4.03 |
| Ωv | 1.25 |
| ϵ/K | 231.8 |

3. Cloruro de vinilo

Para el cloruro de vinilo se ha usado el método de los estados correspondientes (Thodos), para gases polares. La ecuación para dicho método es la siguiente.

$$\mu\xi = (0,755 T_r - 0,055)Z_c^{-5/4} \quad [\mu P] \quad (11-23)$$

$$\xi = T_c^{1/6} M^{-1/2} Z_c^{-5/4} \quad (11-24)$$

$$T_r = T/T_c \quad (11-25)$$

Donde:

- Z_c : Factor de compresibilidad en el punto crítico
- T_c : Temperatura en el punto crítico.
- P_c : Presión en el punto crítico.
- T_r : Temperatura reducida.

Los valores empleados y el de la viscosidad obtenida se encuentran en la **Tabla 11-5**.

Tabla 11-5. Viscosidad del cloruro de vinilo y parámetros para su cálculo

| | |
|--------------|---------|
| μ_i [cP] | 0.01284 |
| μ_i [μP] | 128.4 |
| T [K] | 391 |
| M_i | 62.50 |
| T_r | 0.905 |
| T_c [K] | 432 |
| P_c [atm] | 55.96 |
| ξ | 0.02377 |
| Z_c | 0.2824 |

4. 1,2-dicloroetano

Para el cálculo de la viscosidad del 1,2-dicloroetano se ha utilizado de nuevo el método de los estados correspondientes. En la **Tabla 11-6** se presentan los datos usados y el resultado de estos cálculos.

Tabla 11-6. Viscosidad del 1,2-dicloroetano y parámetros para su cálculo

| | |
|--------------------|---------|
| μ_i [cP] | 0.01283 |
| μ_i [μ P] | 128.3 |
| T [K] | 391 |
| M_i | 98.96 |
| T_r | 0.697 |
| T_c [K] | 561 |
| P_c [atm] | 53 |
| ξ | 0.02046 |
| Z_c | 0.2532 |

5. Dibromometano

Como en los dos compuestos anteriores, para el dibromometano se ha usado de nuevo el método de los estados correspondientes. En la **Tabla 11-7** se presentan los datos usados y el resultado de estos cálculos.

Tabla 11-7. Viscosidad del dibromometano y parámetros para su cálculo

| | |
|--------------------|---------|
| μ_i [cP] | 0.01315 |
| μ_i [μ P] | 131.5 |
| T [K] | 391 |
| M_i | 173.8 |
| T_r | 0.640 |
| T_c [K] | 611 |
| P_c [atm] | 71 |
| ξ | 0.01289 |
| Z_c | 0.3326 |

6. Mezcla

Una vez calculados las viscosidades individuales para cada uno de los compuestos, se ha procedido al cálculo de la viscosidad para la mezcla. Como la composición del gas es variable a lo largo del reactor, se ha decidido calcular la viscosidad para la composición de entrada al reactor y para la composición de salida de este. Finalmente, se ha calculado la media de ambos valores, y este será el valor de la viscosidad usado en cualquiera de los cálculos para el reactor.

Para calcular la viscosidad de la mezcla de gases se ha utilizado la ecuación de Wilke, mostrada a continuación.

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{X_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n X_j \phi_{ij}} \quad [\text{cP}] \quad (11-26)$$

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \right]^2 \quad (11-27)$$

En la **Tabla 11-8** se puede observar un las composiciones, peso molecular y viscosidades empleados.

Tabla 11-8. Composiciones, peso molecular y viscosidades de los compuestos en el reactor

| Compuest o | Composició n inicial: X_{i0} | Composición final: X_{if} | Peso molecular: M_i [kg/m³] | Viscosidad: μ_i [cP] |
|---|--|---|--|--|
| HCl | 0.4959 | 0.0068 | 36,46 | 0,02055 |
| C₂H₂ | 0.4999 | 0.0145 | 26,04 | 0,01322 |
| C₂H₃Cl | 0.0012 | 0.955 | 62,50 | 0,01284 |
| C₂H₄Cl₂ | 0 | 0.0177 | 98,96 | 0,01283 |
| CH₂Br₂ | 0.003 | 0.006 | 173,8 | 0,01315 |

En las **Tabla 11-9** se muestran los cálculos necesarios para llegar a calcular la **Ecuación 11-26**.

Tabla 11-9. Cálculos para la ecuación de Wilke

| i | J | M_i/M_j | μ_i/μ_j | Φ_{ij} | Inicial: $\sum(X_{i0} \Phi_{ij})$ | Final: $\sum(X_{iF} \Phi_{ij})$ |
|----------|-----|-----------|---------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,9711 | 0,6170 |
| | 2 | 0,7142 | 0,6436 | 0,9470 | | |
| | 3 | 1,714 | 0,6249 | 0,6135 | | |
| | 4 | 2,714 | 0,6242 | 0,4788 | | |
| | 5 | 4,768 | 0,6403 | 0,3498 | | |
| 2 | 1 | 1,400 | 1,554 | 1,051 | 1,023 | 0,6197 |
| | 2 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | |
| | 3 | 2,400 | 0,9709 | 0,6155 | | |
| | 4 | 3,800 | 0,9700 | 0,4693 | | |
| | 5 | 6,676 | 0,9948 | 0,3351 | | |
| 3 | 1 | 0,5834 | 1,600 | 1,683 | 1,598 | 1,006 |
| | 2 | 0,4166 | 1,030 | 1,521 | | |
| | 3 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | |
| | 4 | 1,583 | 0,9990 | 0,7866 | | |
| | 5 | 2,781 | 1,025 | 0,5785 | | |
| 4 | 1 | 0,3684 | 1,602 | 2,082 | 1,955 | 1,254 |
| | 2 | 0,2631 | 1,031 | 1,839 | | |
| | 3 | 0,6316 | 1,001 | 1,247 | | |
| | 4 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | |
| | 5 | 1,757 | 1,026 | 0,7524 | | |
| 5 | 1 | 0,2097 | 1,562 | 2,605 | 2,421 | 1,579 |
| | 2 | 0,1498 | 1,005 | 2,249 | | |
| | 3 | 0,3595 | 0,9760 | 1,570 | | |
| | 4 | 0,5693 | 0,9750 | 1,289 | | |
| | 5 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | |

La viscosidad de la mezcla será entonces calculada con la **Ecuación 11-26**. Por lo tanto, los valores de la viscosidad inicial, final y la media de ambas se muestran en la **Tabla 11-10**. Una vez calculados los valores de la viscosidad mediante las correlaciones, se ha comparado los valores que ofrece el software *Aspen Hysys*. Tanto los valores como los errores entre cada viscosidad calculada y obtenida por dicho programa se encuentran en la misma **Tabla 11-10**.

Tabla 11-10. Viscosidad calculada, del Aspen Hysys y error

| | INICIAL | FINAL | MEDIA |
|------------------------|---------|---------|---------|
| μ [cP] calculada | 0.01698 | 0.01296 | 0.01497 |
| μ [cP] Aspen Hysys | 0.01528 | 0.01252 | 0.0139 |
| % ERROR | 11.1 | 3.48 | 7.69 |

Como los errores son bajos, se asume que las propiedades que ofrece este *software* son correctas. Por lo tanto, el resto de las propiedades no serán calculadas mediante correlaciones, sino que se tomarán los valores de este *software*.

11.1.5.2. Determinación de la densidad (ρ), el calor específico (C_p) y la conductividad térmica (k)

Como se acaba de explicar, para el cálculo de las propiedades del fluido se han tomado los valores ofrecidos por el programa *Aspen Hysys*. Igual que para la viscosidad, se ha observado el valor de cada propiedad tanto a la entrada como a la salida del reactor. De tal manera, que el valor usado para los cálculos del reactor resultará de la media aritmética entre el valor de cada propiedad a la entrada y a la salida de este. En la **Tabla 11-11** que se muestra a continuación, se ofrecen los valores obtenidos para cada una de las propiedades.

Tabla 11-11. Densidad, calor específico y conductividad térmica del fluido de proceso

| <i>Propiedad</i> | Entrada del reactor | Salida del reactor | Media |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|
| ρ [kg/m ³] | 1,481 | 2,406 | 1,944 |
| C_p [J/kg K] | 1255 | 6433 | 3279 |
| K [W/m K] | 0,02688 | 0,01726 | 0,02207 |

11.1.6. Resultados

Todas las ecuaciones previamente descritas han servido para el cálculo de los parámetros de diseño básicos del reactor: conversión, masa de catalizador, volumen del reactor, caída de presión y composiciones a la salida del reactor.

Se ha establecido un requerimiento de una conversión mínima de un 95 %. Para dicha conversión la masa de catalizador obtenida es de 1.150 kg de cloruro de mercurio (II). Por lo tanto, la masa total del lecho teniendo en cuenta tanto el catalizador como el carbón activo es de 11.500 kg. Entonces, a partir de la **Ecuación 11-28** se ha calculado un volumen total del reactor de 20,22 m³. También se ha calculado el tiempo de residencia, a partir de la **Ecuación 11-29**, donde el caudal volumétrico usado es el valor medio. El tiempo de residencia es entonces 53,60 s.

$$V = \frac{W'}{(1 - \theta) \rho_p} \quad [\text{m}^3] \quad (11-28)$$

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{V m}{\rho} \quad [\text{s}] \quad (11-29)$$

La caída de presión a lo largo del reactor provoca que el alimento que entra a 152 kPa, resulte en un producto a 134 kPa de presión.

Finalmente, la composición de cada compuesto en el producto se calcula a partir de la **Ecuación 11-30**. Hay que tener en cuenta que no solo se produce cloruro de vinilo en el reactor, sino que también se produce 1,2-dicloroetano como subproducto, y que hay una pequeña cantidad de inerte en el alimento. Se ha asumido que, del reactivo no reaccionado, el 70% reacciona formando el subproducto, mientras que el 30% restante queda sin reaccionar. El inerte se trata de dibromometano.

$$Y_i = \frac{F_i}{F_H F_A F_V F_{sub} F_{in}} \quad (11-30)$$

El resultado de las composiciones a la salida del reactor son las siguientes expuestas en la **Tabla 11-12**.

Tabla 11-12. Composición de la salida del reactor

| COMPUESTO (i) | COMPOSICIÓN DE SALIDA (Y_i) |
|---|--|
| HCl | 0,4959 |
| C₂H₂ | 0,4999 |
| C₂H₃Cl | 0,0012 |
| C₂H₄Cl₂ | 0 |
| CH₂Br₂ | 0,003 |

En la **Tabla 11-13** muestra un resumen con todos los datos usados y obtenidos en el cálculo del reactor.

Tabla 11-13. Datos empleados y resultados obtenidos

| | Inicial | Final |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| $T [K]$ | 391 | |
| X | 0,95 | |
| $W [kg]$ | 1.150 | |
| $-r' [mol/kg s]$ | 0,09656 | $5,417 \cdot 10^{-4}$ |
| $K_r [mol/kg s]$ | 1,013 | |
| $K_H [1/Pa]$ | $3,834 \cdot 10^{-5}$ | |
| $K_A [1/Pa]$ | $1,934 \cdot 10^{-6}$ | |
| $K_V [1/Pa]$ | $1,078 \cdot 10^{-5}$ | |
| $P [Pa]$ | 1.520 | 1.337 |
| $W' [kg]$ | 11.500 | |
| ϵ | 0,4974 | |
| α | $5,911 \cdot 10^{-5}$ | $2,920 \cdot 10^{-5}$ |
| $A [m^2]$ | 1,960 | |
| $\rho_P [kg/m^3]$ | 948,0 | |
| ϕ | 0,4 | |
| θ_0 | 5.007 | 2.473 |
| $G [kg/m^2 s]$ | 0,4916 | 0,2912 |
| $D_P [m]$ | 0,001 | |
| $F_{AE} [mol/s]$ | 11,62 | |
| $F_{HE} [mol/s]$ | 11,53 | |
| $F_{VE} [mol/s]$ | 0,02825 | |
| $C_A [mol/m^3]$ | 23,45 | 2,226 |
| $C_H [mol/m^3]$ | 23,27 | 1,911 |
| $C_V [mol/m^3]$ | 0,05698 | 37,00 |
| y_{HE} | 0,4974 | |
| $p_A [Pa]$ | $7,621 \cdot 10^4$ | 7231 |
| $p_H [Pa]$ | $7,560 \cdot 10^4$ | 6.211 |
| $p_V [Pa]$ | 185,2 | $1,202 \cdot 10^5$ |
| $Q [m^3/s]$ | 0,4957 | 0,2971 |

11.1.7. Sobredimensionamiento del reactor

Para asegurar que la conversión de la reacción deseada se cumpla, se ha decidido sobredimensionar el equipo. El reactor estudiado necesita un volumen de 20,22 m³ para poder alcanzar la conversión de 0,95. Entonces, para asegurar esta conversión, se ha observado que aumentando el volumen del reactor un 20 %, llegando a un total de 24,26 m³, prácticamente se alcanza una conversión de 0,96. Por lo tanto, en caso de que el reactor tenga un rendimiento ligeramente inferior al del reactor diseñado, se asegura que tendrá un volumen extra para garantizar la conversión de 0,95. La evolución de la conversión frente al volumen del reactor sobredimensionado se grafica en la **Figura 11-3** *Error! Reference source not found.*.

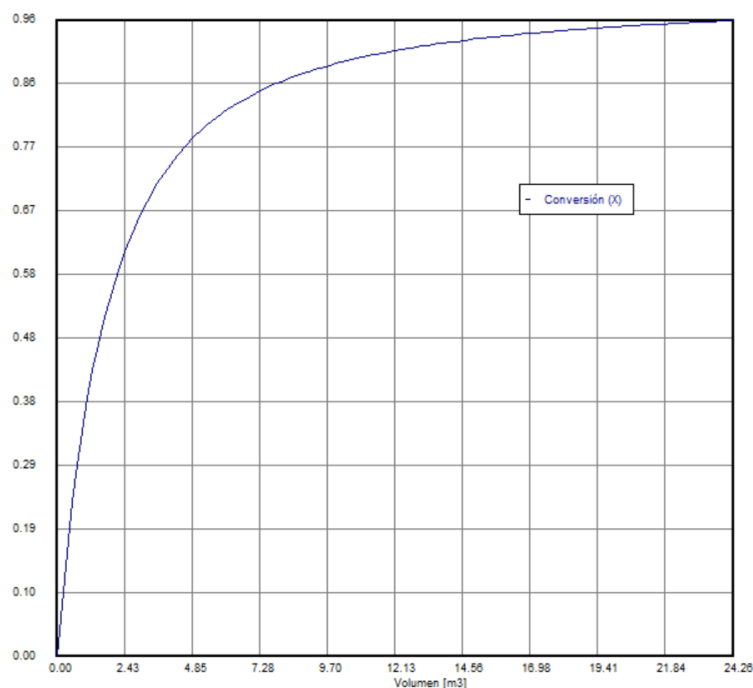


Figura 11-3 Evolución de la conversión frente al volumen del reactor

Teniendo en cuenta que el reactor tiene una forma cilíndrica, el volumen del equipo sigue la siguiente ecuación.

$$V = \frac{\pi D^2 L}{4} \quad [\text{m}^3] \quad (11-31)$$

Como ya se ha especificado en apartados anteriores, el diámetro de este reactor es de 1,58 m. Así pues, conocidos volumen y diámetro, se calcula la longitud a partir de la ecuación anterior. Las dimensiones del reactor quedan reflejadas en la **Tabla 11-14**. El tiempo de residencia también aumentará, obteniéndose un valor de 64,33 s.

Tabla 11-14. Dimensiones del reactor

| | |
|---------------------|-------|
| Volumen [m³] | 24,26 |
| Diámetro [m] | 1,58 |
| Longitud [m] | 12,4 |

11.1.8. Intercambio de calor

Las dimensiones del reactor previamente estudiadas corresponden a un reactor continuo de flujo tubular. Sin embargo, no hay que despreciar que dicho reactor es isotermo, necesitando un refrigerante que absorba el calor liberado debido a la exotermicidad de la reacción. Para aumentar el área de intercambio de calor entre fluido de proceso y refrigerante se diseña un reactor tubular. Dicho reactor constará de tubos por el interior de los cuales circulará el fluido de proceso, y una carcasa por donde circulará el refrigerante. El refrigerante escogido es agua a 75 °C que aprovecha la energía liberada por la reacción para aumentar su temperatura, deviniendo en un salto térmico de 10 °C.

Se ha decidido que en lugar de un solo reactor se trabajará con 3 reactores en paralelo, por lo que se divide tanto volumen como los caudales por 3. Entonces, para un reactor tres veces más pequeño, la conversión será la misma, pero el caudal obtenido tres veces inferior. Para el diseño de las dimensiones de los tubos y la carcasa se ha aplicado un método iterativo basado en el método de Kern, pero con ciertas variaciones. Este método diseña intercambiadores de carcasa y tubos, pero para el diseño de reactores hay que tener en cuenta el tiempo de residencia que este método no contempla.

El primer paso es el cálculo de la energía que se libera de la reacción (q). Bibliográficamente se ha obtenido que la reacción libera 26000 cal por mol de cloruro de vinilo producido. Por lo tanto, se ha obtenido el flujo de energía mediante la siguiente ecuación.

$$q = 26.000 \frac{\text{cal}}{\text{mol CV}} 3,71 \frac{\text{mol CV}}{\text{s}} 4,18 \frac{\text{J}}{\text{cal}} = 403.100 \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (11-32)$$

11.1.8.1. Selección del intercambiador

Para empezar, se ha reducido el volumen y caudales por tres, quedando los valores de un reactor como se muestra en la **Tabla 11-15**. Otra medida que se tomará es la instalación de un cuarto reactor, de modo que se podrá realizar operaciones de mantenimiento en cualquier de los reactores sin que se tenga que parar o reducir la producción.

Este proceso es un método iterativo, por lo cual en este manual de cálculos solo se muestra la última de estas iteraciones. Las dimensiones del reactor se han visto modificadas durante el proceso iterativo, manteniendo en todo momento el mismo volumen del reactor. Las dimensiones finales de un reactor también se encuentran en la misma tabla.

Tabla 11-15. Dimensiones y caudales del reactor

| | |
|---|--------|
| Volumen [m³] | 8,09 |
| Diámetro [m] | 1,07 |
| Longitud [m] | 8,50 |
| Caudal másico (m) [kg/s] | 0,2444 |
| Caudal molar de CV (F_V) [mol/s] | 3,71 |

A continuación, se seleccionan las dimensiones de los tubos. El método de Kern especifica que el diámetro externo oscila entre los 16 y 50 mm, cuanto más pequeño sea este diámetro, más económico y compacto será el intercambiador. Mientras que la longitud de los tubos preferida suele estar entre 1,83 y 4,88 m. Los reactores de carcasa y tubos deben de tener un diámetro interior mínimo 8 veces mayor que el diámetro de la partícula de catalizador (6). El catalizador empleado tiene un diámetro de 1 mm, por lo que el diámetro interior del tubo debe ser igual o mayor a 8 mm. Además, estos reactores no deben tener un diámetro inferior a 60 mm para evitar el riesgo de creación de gradientes de radiación significativos (5). Las dimensiones de los tubos seleccionadas se muestran en la **Tabla 11-16** y cumplen con todos los requisitos que se acaban de describir, excepto la longitud, que ha tenido que ser aumentada para garantizar que el fluido cumple el tiempo de residencia establecido. A esta longitud se le añadirá 25 mm a cada lado para realizar la conexión con el cabezal del reactor.

Tabla 11-16. Dimensiones de los tubos

| | |
|---|----------|
| Diámetro interno (D_i) [m] | 0,036 |
| Diámetro externo (D_E) [m] | 0,040 |
| Grosor de la pared (ΔX) [m] | 0,002 |
| Longitud (L) [m] | 8,50 |
| Volumen 1 tubo [m^3] | 0,008652 |
| Longitud tubo (reactor+cabezal) [m] | 8,55 |

La distribución de los tubos puede ser de tres maneras diferentes: triangular, cuadrada o romboidal. El *pitch* es la distancia entre los centros de dos tubos consecutivos. Se ha seleccionado un *pitch* triangular ya que es el que proporciona las velocidades de transferencia de calor más altas. No obstante, la pérdida de carga será también mayor. El *pitch* recomendado es 1,25 veces mayor a D_E , por lo tanto, será de 0,050 m.

La primera estimación del número de tubos (N_t) se hará a partir del volumen total del reactor y el volumen de un tubo (V_t). Este cálculo se muestra a continuación.

$$N_t = \frac{V_t}{V_{total}} = \frac{0,008652 \text{ m}^3}{8,09 \text{ m}^3} \approx 935 \text{ tubs} \quad (11-33)$$

El siguiente paso es el cálculo del diámetro de carcasa. Este se calcula mediante la suma del haz de tubos (D_b), el espacio que existe entre el haz de tubos y la pared externa de la carcasa, que depende del tipo de carcasa. D_b se calcula a partir de la **Ecuación 11-34**. K_1 y n_1 son valores constantes que dependen del *pitch* seleccionado (triangular) y el número de pasos por tubo (n_{pt}). El método iterativo ha llevado a la selección de 8 pasos por tubo.

$$D_b = D_E \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{n_1} = 0,040 \text{ m} \left(\frac{935}{0,0365} \right)^{2,675} = 1,779 \text{ m} \quad (11-34)$$

Una vez calculado D_b se encuentra gráficamente la diferencia entre el diámetro de carcasa (D_s) y D_b . El gráfico usado se representa en la **Figura 11-4**. Se ha tenido en cuenta que la carcasa seleccionada es de tipo U.

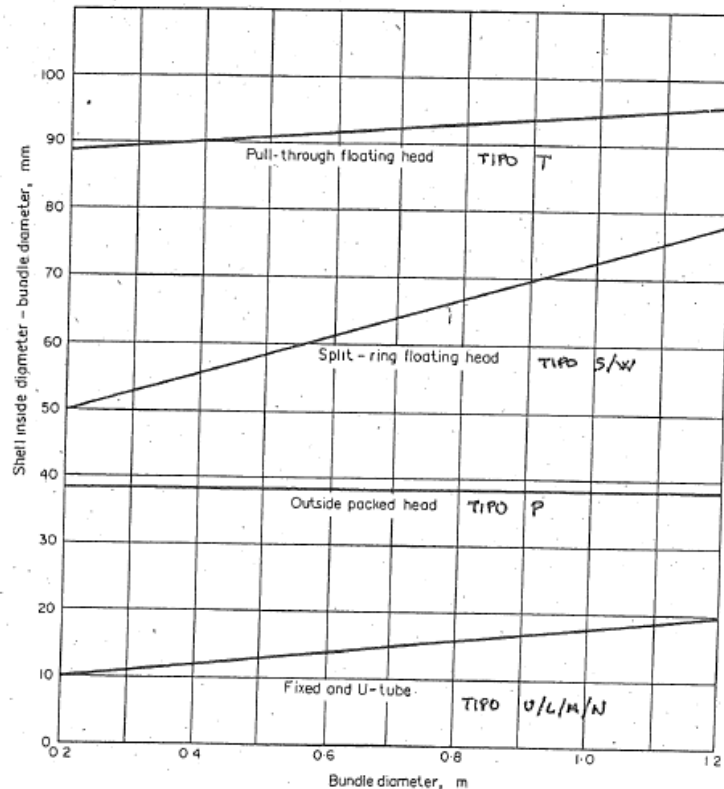


Figura 11-4 Diferencia entre el diámetro de carcasa y el haz de tubos frente al haz de tubos

El valor de $D_s - D_b$ hallado es de 0,0258 m. Por lo tanto, el diámetro de carcasa tendrá un valor de 1,80 m.

A continuación, se ha comprobado que la relación entre la longitud (L) y el diámetro de carcasa (D_s) esté comprendido entre 4 y 6. Este valor es de 4,71, por lo que se podrá continuar diseñando.

El siguiente paso es el cálculo de la velocidad de paso del fluido por tubos (v_t), que dependerá del área de paso para un solo tubo ($A_{paso\ 1\ tubo}$) y del número de tubos por paso (N_{tp}). El cálculo de estos parámetros se realiza mediante las siguientes ecuaciones.

$$v_t = \frac{m_t}{\rho_t A_{paso\ 1\ tubo} N_{tp}} = \frac{0,2444\ kg/s}{1,944\ \frac{kg}{m^3} \cdot 0,00102\ m^2 \cdot 117\ tubos} = 1,06\ \frac{m}{s} \quad (11-35)$$

$$A_{paso\ 1\ tubo} = \frac{\pi D_f^2}{4} = \frac{\pi (0,036\ m)^2}{4} = 0,00102\ m^2 \quad (11-36)$$

$$N_{tp} = \frac{N_t}{n_{pt}} = \frac{935 \text{ tubos}}{8} \approx 117 \text{ tubos} \quad (11-37)$$

Como se puede comprobar, la velocidad es de 1,06 m/s. Esta velocidad no está dentro del rango de velocidades típicas para vapores a presión atmosférica que es de 10 a 30 m/s. Esto es debido a que el fluido debe cumplir un tiempo de residencia, por lo que velocidad debe ser baja para permitir que se cumpla este tiempo. Como el cálculo del número de tubos por paso se redondea para obtener un valor entero, se tiene que recalcular el número de tubos totales en el reactor. Véase el cálculo en la siguiente ecuación.

$$N_t = n_{pt} N_{tp} = 8 \text{ pasos} \cdot 117 \frac{\text{tubos}}{\text{paso}} = 936 \text{ tubos} \quad (11-38)$$

Una vez obtenido el valor final del número de tubos, se recalculará todos los valores previamente estudiados que dependan del número de tubos. Estos parámetros quedarán tal y como se pudo observar en la **Tabla 11-17**.

Tabla 11-17. Dimensiones de la carcasa

| | |
|-----------|------|
| $D_b [m]$ | 1,78 |
| $D_s [m]$ | 1,81 |
| L/D_s | 4,71 |

Una vez llegado a este punto se debe recapitular y comprobar que el tiempo de residencia necesario para que se cumpla el grado de conversión requerido. El tiempo de residencia debe de ser igual o mayor que 64,33 m/s. Este cálculo se muestra a continuación.

$$\tau = \frac{n_{pt} L}{v_t} = \frac{8 \text{ pasos} \cdot 8,50 \frac{m}{\text{paso}}}{1,06 \frac{m}{s}} = 64,41 \text{ s} \quad (11-39)$$

Como el tiempo de residencia es algo superior a 64,33 s, se garantiza que la conversión que se vaya a obtener en el reactor sea la deseada.

Seguidamente se ha calculado las características geométricas de las pantallas deflectoras. Estas características son descritas por dos parámetros:

- Altura libre de la pantalla (*baffle cut*): es el espacio que queda entre pantalla y carcasa. Se expresa como porcentaje del diámetro de carcasa. Los valores óptimos están comprendidos entre el 20 y el 25 %. Para este diseño se ha seleccionado un *baffle cut* del 20 %.

- Espaciado entre pantallas (I_B): Oscila entre 0,2 y 1 veces el diámetro de la carcasa, siendo el rango óptimo entre 0,3 y 0,5. Por lo tanto, se ha seleccionado un valor de 0,3 veces el diámetro de la carcasa.

A partir de I_B se puede calcular el número de pantallas deflectoras. Como el valor debe ser un número entero, se rectificará el valor de I_B . Estos cálculos se muestran a continuación.

$$I_B = 0,3 D_s = 0,3 \cdot 1,81 \text{ m} = 0,542 \text{ m} \quad (11-40)$$

$$\text{número de pantallas} = \frac{L}{I_B} - 1 = \frac{8,50 \text{ m}}{0,542 \text{ m}} = 14,7 \approx 15 \quad (11-41)$$

$$I_B = \frac{L}{\text{núm. pantallas} + 1} = \frac{8,50 \text{ m}}{15 + 1} = 0,531 \text{ m} \quad (11-42)$$

11.8.1.2. Corrección del valor del coeficiente global de transmisión de calor (U)

El siguiente paso es el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor. Para ello se usará el área de intercambio de calor. Las siguientes ecuaciones muestran los cálculos.

$$A = N_t \pi L D_E = 936 \pi 4,13 \text{ m} 0,040 \text{ m} = 999,8 \text{ m}^2 \quad (11-43)$$

$$U = \frac{q}{A \Delta T_{ml}} = \frac{403.100 \frac{\text{J}}{\text{s}}}{999,8 \text{ m}^2 \frac{(118 - 75) - (118 - 85)}{\ln \frac{(118 - 75)}{(118 - 85)}} \text{ K}} = 10,67 \frac{\text{J}}{\text{s m}^2 \text{ K}} \quad (11-44)$$

11.8.1.3. Determinación del coeficiente global de transmisión de calor (U_r) a partir de los coeficientes individuales y los factores de ensuciamiento

Se ha empezado calculando el **coeficiente de convección en el lado del tubo**. Las propiedades físicas del fluido ya han sido previamente estudiadas en el **apartado 11.1.5. Determinación de las propiedades del fluido de proceso**. Esos son los valores que se han usado.

Se ha calculado el área de paso de todos los tubos en un mismo paso (A_{paso}), la densidad de flujo másico (G_{tubo}) y los parámetros adimensionales Reynolds (Re_t) y Prandtl (Pr_t) siguiendo las ecuaciones expuestas a continuación.

$$A_{\text{paso}} = \frac{N_t A_{\text{paso 1 tubo}}}{n_{\text{pt}}} = \frac{936 \text{ tubos } 0,00102 \text{ m}^2}{8 \text{ pasos}} = 0,119 \text{ m}^2 \quad (11-45)$$

$$G_{\text{tubo}} = \frac{m_t}{A_{\text{paso}}} = \frac{0,2444 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,119 \text{ m}^2} = 2,05 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \quad (11-46)$$

$$Re_t = \frac{D_I G_{\text{tubo}}}{\mu} = \frac{0,036 \text{ m } 2,05 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{1,390 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 5,31 \cdot 10^3 \quad (11-47)$$

$$Pr_t = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{1.138 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} 1,390 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}}{0,02207 \frac{\text{J}}{\text{s m K}}} = 0,717 \quad (11-48)$$

$$\frac{L}{D} = \frac{8,50}{0,036} = 236 \quad (11-49)$$

El coeficiente individual de transmisión de calor en el lado del tubo (h_t) se ha calculado a partir del modelo de Ludwig para flujo en interior de tubos con circulación forzada. Se ha empleado la ecuación de Sieder y Tate para calentar gases que circulan en régimen turbulento (6). Para aplicarse esta ecuación se debe cumplir que $2.000 < Re < 100.000$, $0,7 < Pr < 700$ y que $L/D > 60$. Esta ecuación calcula el valor de Nusselt (Nu), a partir del cual se podrá calcular el coeficiente individual. Los cálculos se presentan a continuación.

$$Nu = 0,027 Re_t^{0,8} Pr^{1/3} = 0,027 \cdot 5.310^{0,8} \cdot 0,717^{1/3} = 23,1 \quad (11-50)$$

$$h_t = \frac{Nu k}{D} = \frac{23,1 \cdot 0,02207 \frac{\text{J}}{\text{s m K}}}{0,036 \text{ m}} = 14,2 \frac{\text{J}}{\text{s m K}} \quad (11-51)$$

Este valor está cerca del rango de coeficientes individuales típicos, pues para gases sin cambio de fase este rango comprende desde 15 a 300 W/m² K.

El siguiente factor que se debe calcular es el **coeficiente de convección en el lado de la carcasa** (h_s). En el lado de la carcasa circula agua entre 75 y 85 °C a 1 atm. Primero se ha calculado el valor medio de las propiedades del agua a la temperatura de entrada y salida del reactor. El valor medio se usará para el cálculo de las condiciones de circulación de este fluido. Dichos valores se encuentran en la **Tabla 11-18**.

Tabla 11-18. Propiedades del agua de refrigeración

| Propiedad | Entrada | Salida | Media |
|--|----------|----------|----------|
| $T [^{\circ}\text{C}]$ | 75 | 85 | 12,5 |
| $Cp_s [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$ | 4.193 | 4.200 | 4.197 |
| $\rho_s [\text{kg/m}^3]$ | 974,7 | 968,4 | 971,5 |
| $k_s [\text{W/m}\cdot\text{K}]$ | | | 667,0 |
| $\mu_s [\text{kg/m}\cdot\text{s}] (=cP*0.001)$ | 0.000378 | 0.000334 | 0.000356 |

A continuación, se calcula el área transversal de carcasa (A_{st}), los pasos por carcasa (n_{ps} , que se ha obtenido que serán 2), el caudal másico por carcasa, la densidad de flujo másico por la carcasa (G_s), la velocidad del fluido de carcasa (v_s), el diámetro equivalente de carcasa (D_{eq}), el Reynolds (Re_s) y el Prandtl (Pr_s), a partir de las siguientes ecuaciones.

$$A_{st} = \frac{I_B D_s (\text{pitch} - D_E)}{\text{pitch } n_{ps}} = 0,0959 \text{ m}^2 \quad (11-52)$$

$$m_s = \frac{Q}{C_p \Delta T} = \frac{403.100 \frac{\text{J}}{\text{s}}}{4.161 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} 10 \text{ K}} = 9,61 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (11-53)$$

$$G_s = \frac{m_s}{A_{st}} = \frac{9,61 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,0959 \text{ m}^2} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \quad (11-54)$$

$$v_s = \frac{m_s}{A_{st} \rho_s} = \frac{9,61 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,0959 \text{ m}^2 971,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,103 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (11-55)$$

$$D_{eq} = \frac{1,10}{D_E} (\text{pitch}^2 - 0,917 D_E^2) = 0,0284 \text{ m} \quad (11-56)$$

$$Re_s = \frac{D_{eq} G_s}{\mu_s} = \frac{0,0284 \text{ m } 100 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{0,000356 \frac{\text{kg}}{\text{s m}}} = 7,991 \cdot 10^3 \quad (11-57)$$

$$Pr_s = \frac{C_{ps} \mu_s}{k_s} = \frac{4.197 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} 3,56 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}}{667,0 \frac{\text{J}}{\text{s m K}}} = 0,00224 \quad (11-58)$$

La velocidad está cerca del rango de velocidades típicas de líquidos que circulan por carcasa (0,3-1 m/s).

Para el fluido que circula por carcasa, se usa la correlación de Coulson específica para agua (7), ya que se consigue una estimación más precisa.

$$h_s = 4.200(1,35 + 0,02 T_s) \frac{v_s^{0,8}}{D_i^{0,2}} = 2.640 \frac{W}{m^2 K} \quad (11-59)$$

Donde:

- T_s es la temperatura media entre la entrada y la salida del agua por la carcasa: 80 K.

Finalmente, se comparan los valores obtenidos con el rango de valores típicos, establecidos en la **Figura 11-5** (7). El coeficiente de convección para el lado de los tubos es 14,2 W/m²K, por lo que no es un valor típico ya que para gases que no cambian de fase suele ser entre 20 y 300 W/m²K, pero es un valor cercano. Este valor es tan bajo ya que la velocidad de circulación del fluido por tubos es baja para asegurar que se cumpla el tiempo de residencia. Mientras que, en el lado de la carcasa, el coeficiente de convección es de 2.640 W/m²K, por lo que se comprende dentro del rango típico para el agua que no cambia de fase (1.700-11.000 W/m²K).

Table 9.18. Approximate film coefficients for heat transfer

| | h_i or h_o | |
|---------------------------|--------------------|--------------------------|
| | W/m ² K | Btu/ft ² h °F |
| <i>No change of state</i> | | |
| water | 1700–11,000 | 300–2000 |
| gases | 20–300 | 3–50 |
| organic solvents | 350–3000 | 60–500 |
| oils | 60–700 | 10–120 |
| <i>Condensation</i> | | |
| steam | 6000–17,000 | 1000–3000 |
| organic solvents | 900–2800 | 150–500 |
| light oils | 1200–2300 | 200–400 |
| heavy oils (vacuum) | 120–300 | 20–50 |
| ammonia | 3000–6000 | 500–1000 |
| <i>Evaporation</i> | | |
| water | 2000–12,000 | 30–200 |
| organic solvents | 600–2000 | 100–300 |
| ammonia | 1100–2300 | 200–400 |
| light oils | 800–1700 | 150–300 |
| heavy oils | 60–300 | 10–50 |

Figura 11-5 Valores típicos del coeficiente de convección

A continuación, se determinarán los factores de ensuciamiento. Estos parámetros han sido seleccionados a partir de los rangos típicos. Para el lado del tubo, se ha escogido el valor típico para gases orgánicos (5.000 W/m²·K), mientras que para el lado de la carcasa se ha escogido un valor dentro del rango típico para agua de enfriamiento (4.000 W/m²·K).

Por lo que a la **conducción de calor** respecta, se ha tenido en cuenta que el material del que están hechos los tubos es Hastelloy, por lo que la conductividad de este material (k_H) será de 10 W/m·K.

Finalmente se calcula el **coeficiente global de transmisión de calor real (U_R)** a partir de la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{U_R} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_i} + \frac{D_E \ln\left(\frac{D_E}{D_I}\right)}{2 k_H} + \frac{D_E}{D_I h_{rt}} + \frac{D_E}{D_I h_{rs}} \quad (11-60)$$

El valor obtenido para el coeficiente global de transmisión de calor real es de 13,94 W/m²K. El coeficiente global calculado inicialmente es inferior al coeficiente global real ($U_R > U$), con un 23 % de error, por lo que se da por cerrada la iteración y se considera que **10,67 W/m²K** es el valor del coeficiente global de transmisión de calor que se obtendrá.

Finalmente se calculan las pérdidas de carga tanto en el lado de los tubos como en el de la carcasa.

Para el lado del tubo, la ecuación que se usa considera que el sistema es isoterma y que hay pérdidas por fricción. La ecuación es la siguiente, teniendo en cuenta que j_f es un factor que depende del Reynolds y en este caso corresponde a 0,007.

$$\Delta P_t = N_{pt} \left[8 j_f \left(\frac{L}{D_I} \right) + 2,5 \right] \frac{\rho v_t^2}{2} = 136 \text{ Pa} = 0,136 \text{ kPa} \quad (11-61)$$

Esta caída de presión se debe a la circulación del fluido de proceso por los tubos. Es inferior a la mitad de la presión manométrica, por lo que está dentro de los valores típicos para gases entre 1 y 2 bares. En el **apartado 11.1.3**. Ecuación de Ergun ya se había calculado una caída de presión, con lo que se había obtenido que el fluido salía del reactor a una presión de 133,7 kPa, debido a la circulación del gas a través del lecho. Por lo tanto, a esta presión de salida se le debe restar 0,136 kPa, obteniéndose que **el producto sale del reactor a una presión de 133,6 kPa**.

También se calcula la pérdida de presión del agua refrigerante a partir de la siguiente ecuación.

$$\Delta P_s = n_{ps} 8 j_f \frac{\rho v_s^2}{2} \left(\frac{L}{I_B} \right) \left(\frac{D_s}{D_{eq}} \right) = 5.040 \text{ Pa} = 5,04 \text{ kPa} \quad (11-62)$$

Esta caída de presión está dentro del rango de valores típicos (5-70 kPa) para la caída de presión de líquidos con una viscosidad de entre 1 y 10 cP, como es el caso. Como el agua de refrigeración entra a 101,3 kPa, se obtiene que el agua sale a una presión de 91,6 kPa.

11.1.9 Diseño cabezales

Una vez definidas las medidas de los tubos y la carcasa, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER (8), como marca la **Figura 11-6**.

| Calculadora de fondos KLOPPER | |
|---|------|
| Diametro exterior (mm) | 1810 |
| Espesor (mm) | |
| <p>fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p> | |
| Diametro disco (mm) | 2004 |
| R (mm) | 1810 |
| r (mm) | 181 |
| h (mm) >= | 0 |
| f (mm) | 350 |
| H (mm) | 350 |
| V (sin h) (litros) | 593 |
| Peso (h minima) (kg) | 0 |
| <input type="button" value="Calcular"/> | |
| <small>HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.</small> | |

Figura 11-6 Diseño cabezales reactor

11.1.10 Peso del equipo

El peso de los reactores vacíos se divide en 4 partes: el peso del cuerpo cilíndrico, el peso de los cabezales, el peso de los tubos y el peso del aislante. Teniendo en cuenta que los cabezales son toriesféricos, las expresiones matemáticas para calcular el peso del equipo vacío son:

$$P_R = P_{cil} + 2 \cdot P_{cab} + P_{tubos} + P_{aisl} \quad (11-63)$$

$$P_{cil} = \pi \cdot H_{cil} \cdot \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{material} \quad (11-64)$$

$$P_{cab} = \frac{1}{12} \cdot \rho_{material} \cdot (D_e^3 - D_i^3) \quad (11-65)$$

$$P_{aisl} = \pi \cdot H_{cil} \cdot \left(\left(\frac{D_{eais}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{i ais}}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{aislante} \quad (11-66)$$

$$P_{tubo} = \pi \cdot H_{tubo} \cdot \left(\left(\frac{D_{te}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{ti}}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{tubos} \quad (11-67)$$

$$P_{tubos} = P_{tubo} \cdot N^{\circ}_{tubos} \quad (11-68)$$

En la siguiente **Tabla 11-19** Propiedades del agua de refrigeración se muestran los valores calculados para encontrar el peso total del reactor vacío:

Tabla 11-19 Propiedades del agua de refrigeración

| | |
|----------------------------|--------------|
| Peso cilindro (kg) | 1.386 |
| Peso cabezales (kg) | 48,7 |
| Peso aislante (kg) | 326,7 |
| Peso 1 tubo (kg) | 18,1 |
| Peso tubos (Tn) | 16,98 |
| Peso reactor (Tn) | 18,795 |

A continuación, se ha calculado el peso del equipo lleno de y en operación, para ello se han sumado el peso total del equipo vacío, más el peso del agua, o del fluido de operación, de tubos y carcasa.

Para ello se ha tenido que calcular el volumen de los tubos y de la carcasa, siendo estos de 8,09 m³ y 14,1 m³ respectivamente.

$$P_{tubos_{agua}} = V_{tubos} \cdot \rho_{agua} \quad (11-69)$$

$$P_{carcasas_{agua}} = V_{carcasa} \cdot \rho_{agua} \quad (11-70)$$

$$P_{total_{agua}} = P_{tubos_{agua}} + P_{carcasa_{agua}} + P_{vacío} \quad (11-71)$$

$$P_{tubos_{operación}} = V_{tubos} \cdot \rho_{producto} \quad (11-72)$$

$$P_{total\,operación} = P_{tubos\,operación} + P_{carcasa\,agua} + P_{vacío} \quad (11-73)$$

Donde:

- $P_{tubos,agua}$: Peso agua que circula por el interior de los tubos (kg): 8,09 Tn
- V_{tubos} : Capacidad de los tubos del reactor (m^3): 8,09 m^3
- ρ_{agua} : Densidad agua (kg/m^3): 1000 kg/m^3
- $P_{carcasa,agua}$: Peso agua que circula por la carcasa (kg): 14,1 Tn
- $V_{carcasa}$: Capacidad de la carcasa, restando el volumen de los tubos (m^3): 14,1 m^3
- $P_{total,agua}$: Peso del equipo lleno de agua (kg)
- $P_{tubos,operación}$: Peso del fluido que circula por tubos (kg): 19,5 kg
- $\rho_{producto}$: Densidad del gas que circula por los tubos (kg/m^3): 2,41 kg/m^3
- $P_{vacío}$: Peso del equipo vacío (kg): 18,795 Tn
- $P_{total,operación}$: Peso del equipo lleno en las condiciones de operación (kg)

Mediante estas ecuaciones se calculan los dos pesos totales, siendo estos:

- **$P_{total,agua}$: 40,99 Tn**
- **$P_{total,operación}$: 32,92 Tn**

11.2. DISEÑO INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para enfriar, calentar, evaporar o condensar las diferentes corrientes que circulan por el proceso se utilizan intercambiadores de calor.

Para el diseño riguroso de los intercambiadores se utiliza el programa *Aspen Exchanger Desing and Rating v 8.4*. Este programa contiene las herramientas necesarias para el diseño óptimo, al mejor precio y que cumpla con el código ASME.

11.2.1 Aspectos a tener en cuenta en el diseño de los intercambiadores

En este apartado se resumen los parámetros y aspectos más importantes a tener en cuenta para el diseño de los intercambiadores de calor.

11.2.1.1 Tipos de intercambiadores

El tipo de intercambiadores que se utilizarán en esta planta son los de carcasa y tubos, ya que presentan muchas ventajas sobre los demás, como un fácil diseño, una fácil limpieza o que son más económicos que la mayoría de intercambiadores. En la **Figura 11-7**, se muestra un ejemplo de este tipo.

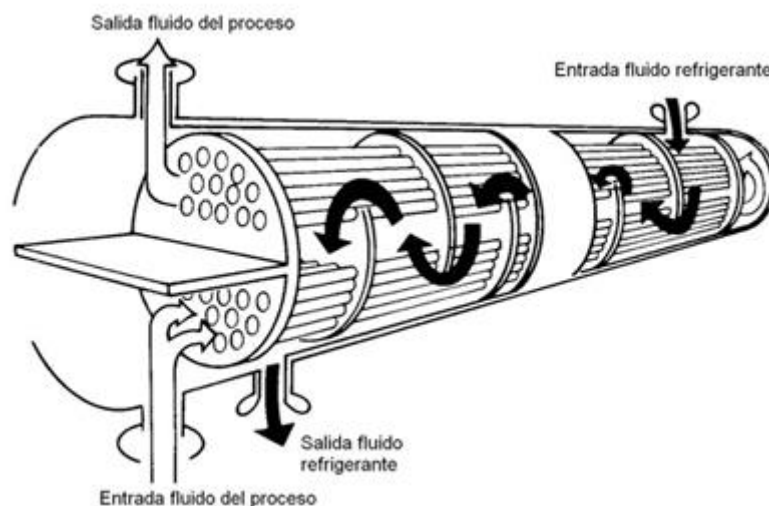


Figura 11-7 Intercambiador de calor

Partiendo de estos intercambiadores, en la planta se dispondrá de diversos tipos de intercambiadores de carcasa y tubos, que se dividirán en cuatro grandes grupos.

1. Intercambiadores refrigerantes
2. Intercambiadores calentadores
3. Reboilers
4. Condensadores

En este caso, los intercambiadores de los grupos 1 y 2 no presentan cambios de fase en el fluido que circula por su interior, mientras que los fluidos de los intercambiadores de los grupos 3 y 4 sí presentan un cambio de fase.

11.2.1.2 Circulación de los fluidos

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en un intercambiador de calor es la localización de los fluidos. En el caso de los intercambiadores de nuestra planta, la circulación de éstos puede ser por la carcasa o por los tubos. Para determinar qué fluido circula por la carcasa y cuál por los tubos hay diferentes indicaciones que se deben seguir.

- En el caso de los tubos, circularán por éstos los fluidos más corrosivos y tóxicos, así como los que sean más limpios (debido a la dificultad de limpieza de tubos). Los fluidos con mayor presión y temperatura también circularán por tubos, ya que así el coste energético será menor.
- En el caso de la coraza, circularán por ella los fluidos más viscosos, con menor pérdida de presión y sean más sucios, ya que ésta es más sencilla de limpiar.
- Si se trata de vapores que no condensan, circularan por los tubos de manera que éstos se arrastren y no se acumulen.
- Los caudales de vapor elevados circularán por la carcasa, ya que tienen más espacio disponible.

11.2.1.3 Velocidades típicas de circulación

La velocidad de los fluidos también es un aspecto muy importante a tener en cuenta, ya que existen unos valores típicos según su localización, tipo de fluido y presión a la que circulan. En la **Tabla 11-20** Velocidades típicas se muestran dichos valores:

Tabla 11-20 Velocidades típicas

| LÍQUIDOS | |
|---------------------|-------------|
| Por tubos | 1 - 2 m/s |
| Por carcasa | 0,3 - 1 m/s |
| GASES Y VAPORES | |
| Vacío | 50 - 70 m/s |
| Presión atmosférica | 10 - 30 m/s |
| Altas presiones | 5 - 10 m/s |

11.2.1.4 Características de los tubos

Los tubos de los intercambiadores suelen tener diámetros externos entre 16 y 50 mm. Generalmente se utilizan tubos de diámetros pequeños debido a que el equipo es más económico y compacto, aunque los tubos más anchos son más fáciles de limpiar por métodos mecánicos, éstos se suelen utilizar en fluidos con alto riesgo de incrustaciones.

Por lo que hace referencia al grosor de los tubos, éste viene determinado por la presión interna y el factor de corrosión.

Otro factor importante es la longitud de los tubos y su valor típico oscila entre 1,2 y 4,8 metros. Hay que tener en cuenta que a tubos más largos el diámetro de la carcasa será más bajo.

Además, los tubos se tienen que distribuir de una forma específica, ya sea triangular, cuadrada o romboidal tal y como se muestra en la **Figura 11- 8**.

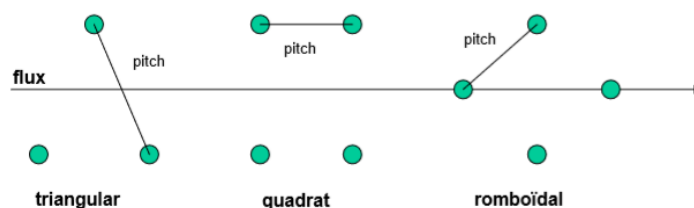


Figura 11- 8 Distribución tubos

Tal y como se acaba de observar, el pitch es la distancia entre dos tubos consecutivos, y según cuál sea se presentan unas características determinadas.

Los pitch triangulares y romboidales presentan altas velocidades de transferencia de calor, mientras que el pitch cuadrado provoca pérdidas de presión más bajas. Por norma el pitch recomendado es de 1,25 veces el diámetro externo del tubo. Además, cada tipo de disposición tiene una aplicación diferente. Éstas se exponen en la **Tabla 11-21** Tipo de Pitch:

Tabla 11-21 Tipo de Pitch

| Tipo de disposición | Aplicaciones |
|-----------------------|--|
| Triangular 30° | El más utilizado, debido a su posibilidad de utilización en cualquier régimen de circulación y con factores de ensuciamiento bajos |
| Romboidal 60° | Poco utilizado debido a su alta caída de presión |
| Cuadrado 45° | Utilizado en flujos laminares con $Re < 2000$ |
| Cuadrado 90° | Utilizado en casos donde la limpieza es crítica y el flujo es turbulento, y en casos de limitación de caída de presión |

11.2.1.5 Características de la carcasa

El diámetro de la carcasa suele situarse entre 150 y 1500 mm y es un aspecto importante a tener en cuenta, ya que se debe cumplir una relación de carcasa y longitud de tubos de entre 4 y 6.

Según la normativa TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*), existen diversas configuraciones de carcasas, que se muestran en la **Tabla 11-22** Configuraciones de carcasas que se muestra a continuación.

Tabla 11-22 Configuraciones de carcasas

| Tipo | Significado |
|------|--|
| E | Un solo paso |
| F | Dos pasos con pantalla deflectora longitudinal |
| G | Flujo distribuido |
| H | Doble flujo distribuido |
| J | Flujo dividido |
| K | Reboiler tipo Kettle |
| X | Flujo cruzado |

11.2.1.6 Pantallas deflectoras (*Baffles*) y separación entre ellas

Las pantallas deflectoras o *baffles*, se determinan principalmente por dos características geométricas:

- La altura libre. Es el espacio entre la pantalla y la carcasa por donde pasará el fluido de la carcasa. Ésta tiene que estar entre un 15 i 45% del diámetro de la carcasa. Los óptimos de diseño son entre un 20 y 25%
- El espaciado entre pantallas. Como su propio nombre indica, es la distancia entre dos pantallas deflectoras. Éste suele oscilar entre 0,2 y 1 veces el diámetro de la carcasa, siendo el rango óptimo entre 0,3 y 0,5 el diámetro de ésta.

En la **Figura 11-9** se representan estas dos características geométricas.

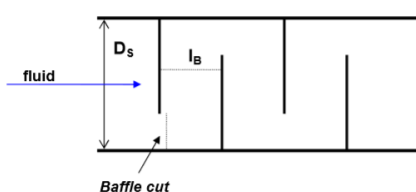


Figura 11-9 Representación altura libre y espaciado entre pantallas

Donde *baffle cut* es la altura libre y l_B es el espaciado entre pantallas.

11.2.1.7 Coeficiente de ensuciamiento (*fouling*)

El valor del coeficiente de ensuciamiento varía según el fluido que se utiliza. Este ensuciamiento interior y exterior de los tubos de los intercambiadores opone una resistencia a la transmisión de calor y por ello es un factor importante a tener en cuenta, y más aún en fluidos sucios.

Los coeficientes de ensuciamiento de los diferentes fluidos que intervienen en el proceso se recogen en la **Tabla 11-23** Coeficientes de ensuciamiento:

Tabla 11-23 Coeficientes de ensuciamiento

| Fluido | Coeficiente de ensuciamiento ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) |
|------------------|---|
| Vapor | 0,00009 |
| Agua de torre | 0,00009 |
| Gases de proceso | 0,00018 |

11.2.1.8 Pérdidas de Presión

Las pérdidas de presión se deben principalmente a pérdidas por fricción y a contracciones/expansiones. Estas pérdidas se pueden estimar mediante métodos correlativos y sus límites dependen del estado del fluido. Los límites de las pérdidas de presión se recogen en la **Tabla 11-24** Límites pérdidas de presión

Tabla 11-24 Límites pérdidas de presión

| Líquidos | | Gases | |
|-----------------|---|---------------|---|
| Viscosidad (cP) | Pérdida de presión (kN/m^2) | Presión | Pérdida de presión (kN/m^2) |
| $\mu < 1$ | 35 | Vacío elevado | 0,4 - 0,5 |
| $1 < \mu < 10$ | 5 - 70 | Vacío medio | 0,1 P_{absoluta} |
| | | 1 a 2 bar | 0,5 $P_{\text{manométrica}}$ |
| | | > 10 atm | 0,1 $P_{\text{manométrica}}$ |

11.2.2 Diseño con **ASPEN EXCHANGER DESIGN AND RATING V 8.4**

Para el diseño de los intercambiadores de calor se ha utilizado el programa *Aspen Exchanger Design and Rating*. Este programa utiliza tanto el código TEMA como el ASME para el diseño riguroso de éstos. Además, también calcula el precio aproximado del intercambiador, hecho que facilitará más adelante el apartado de valoración económica. El programa siempre intenta proporcionar el diseño más óptimo posible, pero puede pasar que éste no cumpla con algunos de los requisitos necesarios que deben darse para el diseño de este tipo de equipos. Una vez se tienen los parámetros necesarios para el diseño, se deben introducir en el programa. A continuación, se muestra un ejemplo, más concretamente el diseño del intercambiador E-501, que servirá como ejemplo para todos los demás.

11.2.2.1 Características geométricas del intercambiador

En primer lugar, en el apartado **Console**, se establecen unas características básicas en la geometría del intercambiador. Como se observa en la **Figura 11-10**, se determina qué tipo de intercambiador se va a utilizar, en este caso el BFM, que por tubos circulará el fluido caliente, que el tipo de pitch establecido es el triangular y que el material que se utilizará es el SS 316L.

Figura 11-10 Apartado 'Console'

11.2.2.2 Introducción de los parámetros del proceso

En segundo lugar, en el apartado **Process Data**, se introducen los parámetros de temperatura, presión, caudales y cambios de fase. Éstos se muestran en la **Figura 11- 11**:

Figura 11- 11 Apartado 'Process Data'

11.2.2.3 Introducción de las composiciones de los fluidos

En el siguiente paso, se introducen los componentes que forman parte de cada fluido y sus composiciones molares en el apartado **Property Data**. En la **Figura 11- 12**, se muestra el caso del fluido que circula por tubos.

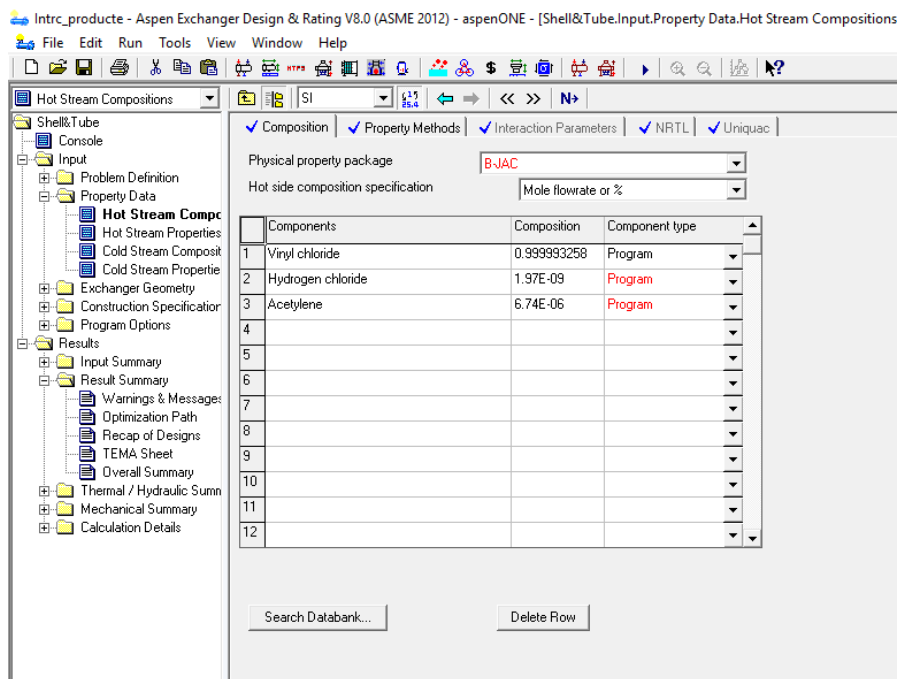


Figura 11- 12 Apartado 'Property Data'

Para el caso de la carcasa, al ser solamente agua, se añade el compuesto *Water* y una composición de 1.

11.2.2.4 Resultados del diseño

Finalmente, una vez se han introducido todos los datos de diseño necesarios, el programa se encarga de buscar el diseño más óptimo.

Si no hay ningún error especificado por el programa, se pueden revisar todos los detalles del diseño en el **TEMA Sheet**, tal y como se muestra en la **Figura 11-13**:

| Heat Exchanger Specification Sheet | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|--------------|------------------------------|-----------|------------------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | See | 254 - 1828.8 | mm | Type | BFM |
| 6 | Surf/area (ft ²) | 6.9 | Surf/area (ft ²) | 6.9 | Surf/area (ft ²) |
| 7 | | | | | |
| 8 | PERFORMANCE OF ONE UNIT | | | | |
| 9 | Fluid allocation | Shell Side | | Tube Side | |
| 10 | Fluid name | Agua | | Producto | |
| 11 | Fluid quantity, Total | 6000 | | 2496 | |
| 12 | Vapor (m ³ /out) | 0 | 0 | 0.6333 | 0 |
| 13 | Liquid | 1.6867 | 1.6867 | 0 | 0.6333 |
| 14 | Noncondensable | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | | | | | |
| 16 | Temperature (in/out) | 5 | 37.11 | 70.13 | 27.93 |
| 17 | Dew / Bubble point | | | 58.44 | 58.44 |
| 18 | Density | / 998.14 | / 995.46 | 28.62 | / 919.53 |
| 19 | Viscosity | / 1.5466 | / 0.6305 | 0.0126 | / 0.1917 |
| 20 | Molecular wt. Vap | 62.5 | | | |
| 21 | Molecular wt. NC | | | | |
| 22 | Specific heat | / 4.2 | / 4.188 | 0.942 | / 1.347 |
| 23 | Thermal conductivity | / 0.5731 | / 0.6162 | 0.0099 | / 0.1111 |
| 24 | Latent heat | 303.9 | | | |
| 25 | Pressure (abs) | 200 | 189.584 | 1216 | 1209.545 |
| 26 | Velocity | 0.53 | | | |
| 27 | Pressure drop, allow./calc. | bar | 0.39645 | 0.10415 | 0.25855 |
| 28 | Fouling resistance (min) | 0 | | | |
| 29 | Heat exchanger | 224.4 | 34.08 | | |
| 30 | Transfer rate, Service | 951.1 | Dirty | 975.5 | MTD corrected |
| 31 | CONSTRUCTION OF ONE SHELL | | | | |
| 32 | Design/vac/test pressure:g | bar | 1.44738/ | 3.78952/ | |
| 33 | Thermal conductivity | W/m K | 110 | 110 | |

Figura 11-13 Apartado 'TEMA Sheet'

Tal y como se observa en la **Figura 11- 12**, en este apartado se recogen todos los datos de diseño. Mediante la **Tabla 11-20**, se comprueba que el valor de las velocidades de los fluidos está dentro del rango de velocidades típicas.

También se comprueba que la relación L/D entre la longitud de los tubos y el diámetro de carcasa esté dentro del margen de 4-6. Así mismo, otro aspecto importante a controlar es la longitud y diámetro de los tubos, que tienen que estar comprendidos entre 1,2 y 4,8 m y 16 y 50 mm respectivamente.

Para el diámetro de la carcasa, tal y como se ha comentado con anterioridad, se ha comprobado que su valor oscila entre 150 y 1500 mm.

Intrac_producte - Aspen Exchanger Design & Rating V8.0 (ASME 2012) - aspenONE - [Shell&Tube.Results.Result Summary.Optimization Path]

File Edit Run Tools View Window Help

Optimization Path

Current selected case: 4

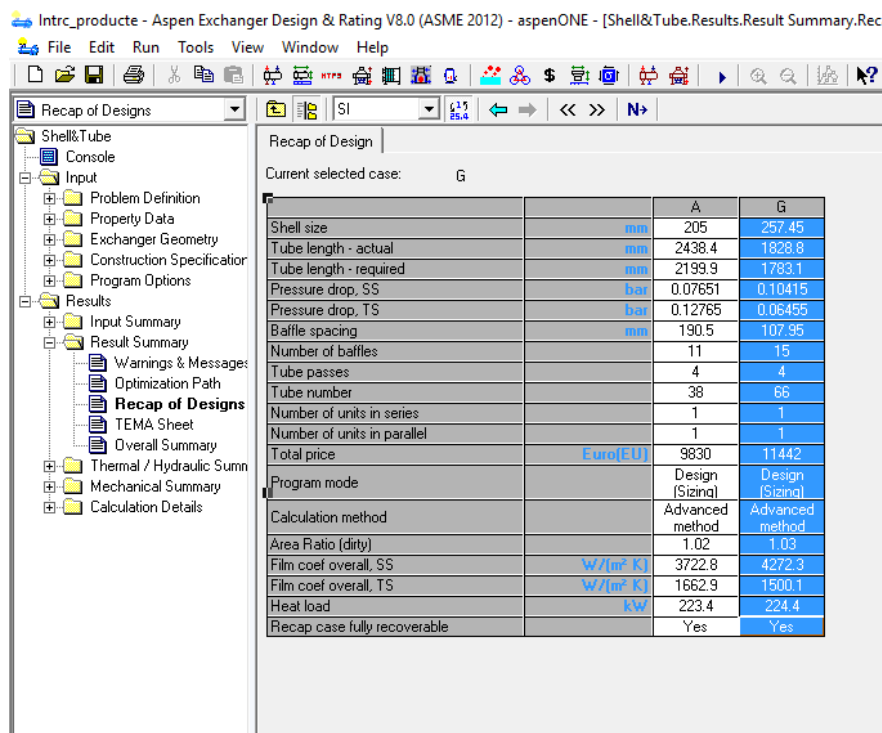
| Item | Shell Size | Tube Length | | | Area ratio | Pressure Drop | | | Pitch | Baffle No. | Tube Pass | Units | Total | Design Status | |
|------|------------|-------------|--------|------|------------|----------------|---------------|------|--------|------------|-----------|-------|-------|---------------|----|
| | | Actual | Reqd. | | | Shell Dp Ratio | Tube Dp Ratio | | | | | | | | |
| 1 | 205 | 3048 | 2946.8 | 1.03 | 0.04808 | 0.12 | 0.0446 | 0.17 | 406.4 | 6 | 2 | 44 | 1 | 10370 | OK |
| 2 | 205 | 2438.4 | 2312.8 | 1.05 | 0.07657 | 0.19 | 0.12728 | 0.49 | 190.5 | 11 | 4 | 38 | 1 | 9830 | OK |
| 3 | 257.45 | 2438.4 | 2376.7 | 1.03 | 0.03167 | 0.08 | 0.03054 | 0.12 | 514.35 | 3 | 2 | 72 | 1 | 11844 | OK |
| 4 | 257.45 | 1828.8 | 1783.1 | 1.08 | 0.10415 | 0.26 | 0.08455 | 0.25 | 107.85 | 15 | 4 | 66 | 1 | 11442 | OK |
| 5 | 257.45 | 1828.8 | 1695.5 | 1.08 | 0.03318 | 0.08 | 0.11705 | 0.45 | 400.05 | 3 | 6 | 63 | 1 | 10905 | OK |
| 2 | 205 | 2438.4 | 2312.8 | 1.05 | 0.07657 | 0.19 | 0.12728 | 0.49 | 190.5 | 11 | 4 | 38 | 1 | 9830 | OK |

Figura 11-14 Apartado 'Optimization Path'

Por último, cabe mencionar que es posible que algunos valores comentados anteriormente no se ajusten a los diseños de todos los intercambiadores de la planta, ya que éstos son valores típicos, pero no obligatorios. Indiferentemente, se ha intentado siempre que estos valores estén dentro de los rangos típicos, es por eso que, si el resultado que nos da el programa no es el adecuado, se ha ido al apartado **Optimization Path**, como se observa en la **Figura 11-14**, y se ha comprobado si hay alguna resolución alternativa que cumpla los requisitos típicos.

11.2.2.5 Precio del diseño

El precio de los intercambiadores de calor es un parámetro importante que se puede conocer gracias al programa. Este valor se encuentra en el apartado de **Recap of Designs**, junto a otros parámetros como se muestra en la **Figura 11-15**:



| Recap of Design | | A | G |
|------------------------------|----------|-----------------|-----------------|
| Current selected case: G | | | |
| Shell size | mm | 205 | 257.45 |
| Tube length - actual | mm | 2438.4 | 1828.8 |
| Tube length - required | mm | 2199.9 | 1793.1 |
| Pressure drop, SS | bar | 0.07651 | 0.10415 |
| Pressure drop, TS | bar | 0.12765 | 0.06455 |
| Baffle spacing | mm | 190.5 | 107.95 |
| Number of baffles | | 11 | 15 |
| Tube passes | | 4 | 4 |
| Tube number | | 38 | 66 |
| Number of units in series | | 1 | 1 |
| Number of units in parallel | | 1 | 1 |
| Total price | Euro(EU) | 9830 | 11442 |
| Program mode | | Design (Sizing) | Design (Sizing) |
| Calculation method | | Advanced method | Advanced method |
| Area Ratio (dirty) | | 1.02 | 1.03 |
| Film coef overall, SS | W/(m² K) | 3722.8 | 4272.3 |
| Film coef overall, TS | W/(m² K) | 1662.9 | 1500.1 |
| Heat load | kW | 223.4 | 224.4 |
| Recap case fully recoverable | | Yes | Yes |

Figura 11-15 Apartado 'Recap of Designs'

Tal y como se muestra en la **Figura 11-15**, su precio aproximado es de 11442€.

Los cinco pasos explicados se han seguido para el diseño de todos los intercambiadores de la planta. Los parámetros de cada uno de ellos se encuentran especificados en el apartado 2. *Equipos*.

11.3 DISEÑO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO / PULMÓN

En este apartado se recogen los cálculos que se han realizado para el diseño de los tanques de almacenamiento y pulmón necesarios para materias primas, productos y servicios. En primer lugar, se realizará una explicación general sobre el diseño mecánico de cada uno de los tanques, válida para todos ellos, ya que todos han sido diseñados bajo el código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) para tanques a presión y la ITC-MIE-APQ.

Antes de pasar a la explicación detallada del diseño de cada tanque, se definirán algunos aspectos importantes que se han debido tener en cuenta para el diseño de los tanques.

- Stock:

Para el producto y subproducto generado es necesario especificar la cantidad que habrá almacenada. Es necesario prever retrasos en la retirada de éstos, aumentos de la producción, fallos de seguridad, etc. Por ello se ha decidido tener un stock variable de 3 días tanto para el producto y subproductos.

- Venteo:

Los sistemas de venteo son emisiones gaseosas controladas que se llevan a cabo cuando es necesaria la regulación de la presión de un tanque con la finalidad de evitar posibles deformaciones que puedan dañar la estructura de éste como consecuencia de aumentos o disminuciones de la presión interna.

En esta planta todos los fluidos están almacenados en recipientes a presión, por lo que el caudal de venteo de emergencia se rige por la siguiente ecuación:

$$Q_{vent} = \frac{Q}{L} \quad (11-74)$$

Donde:

- Q_{vent} : Caudal de venteo
- Q : Calor recibido en caso de fuego extremo (kJ/h)
- L : Calor latente de vaporización en las condiciones de venteo (kJ/kg)

Para el cálculo de Q se utiliza la ecuación que se muestra a continuación:

$$Q = 139,7 \cdot F \cdot A^{0,82} \cdot 10^3 \quad (11-75)$$

Donde:

- F: Factor de reducción sin dimensiones, que tomará los valores según los datos de la **Figura 11-16** (14): **Error! Reference source not found.**

El factor F se tomará igual a la unidad, salvo en los casos siguientes, en que se tomarán los valores que se indican:

| Protección | Factor F |
|---|----------|
| Drenaje alejado o cubeto a distancia y superficie húmeda superior a 20 m ² | 0,5 |
| Sistema de pulverizadores de agua fijos y automáticos para la prevención de incendios y cubeto a distancia | 0,3 |
| Aislamiento no afectado por fuego ni chorro de agua y con una conductividad térmica máxima a 900 °C de 83,75 kJ/(h x m x °K) [20 kcal/(h x m x °C)] | 0,3 |
| Aislamiento igual al anterior y sistema de pulverización de agua fijo y automático | 0,15 |

Figura 11-16 Valores Factor F

- A: Superficie húmeda (m²), que se calcula con la siguiente ecuación:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (11-76)$$

Donde:

- r: Radio del tanque (m)
 - h: altura del cuerpo cilíndrico (m)
- Inertización de los tanques:
Cuando se almacenan sustancias altamente volátiles, explosivas o propensas a la oxidación, la conservación del producto y la seguridad adquieren de gran importancia. La adición de un gas inerte como el nitrógeno, gases nobles o CO₂, reduce la concentración de oxígeno en un ambiente peligroso reduciendo, o eliminando, la posibilidad de explosión o incendio en el interior del tanque.
La inertización con nitrógeno es un método seguro y fiable para mantener constantemente una capa protectora de gas por encima de la sustancia, creando a la par una sobrepresión dentro del tanque, dificultando la entrada de gases procedentes de la atmósfera.

11.3.1 Diseño mecánico

En este apartado se presentan las ecuaciones y cálculos realizados para poder definir el diseño mecánico de los tanques. Como se ha dicho anteriormente, para el diseño de éstos, se ha seguido el código ASME para equipos que trabajan bajo presiones internas superiores a la atmosférica, y la normativa ITC-MIE-APQ.

- Temperatura de diseño

Todos los tanques tienen una temperatura de operación fijada, lo que para realiza el diseño mecánico se ha aplicado un margen de seguridad de 15°C. La ecuación siguiente define su cálculo:

$$T_D = T_O + 15 \quad (11-77)$$

Donde:

- T_D : Temperatura de diseño (°C)
- T_O : Temperatura de operación (°C)

La temperatura de diseño, aunque no aparece en las ecuaciones del código ASME para el cálculo del espesor de las paredes y cabezales de los tanques, tiene un papel importante en la determinación de la tensión máxima admisible para que el equipo no sufra daños permanentes, ya que este parámetro depende de la temperatura.

- Presión hidrostática

La presión hidrostática corresponde a la presión que ejerce el fluido que se encuentra en el interior del tanque a las paredes y el fondo de éste. Este parámetro, aunque pueda parecer mucho mejor que la presión a la que se encuentre almacenada la sustancia, se debe tener en cuenta en el cálculo de la presión total a la que se realiza el diseño. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_H = \rho \cdot g \cdot H \quad (11-78)$$

Donde:

- P_H : Presión hidrostática (Pa)
- ρ : Densidad del fluido (kg/m³)
- g : Gravedad (m/s²)
- H : Altura de la columna de fluido (m)

Una vez se ha determinado la presión hidrostática, se calcula la presión a la que se realizará el diseño.

- Presión de diseño

La presión a la que se realiza el diseño, definida por la ecuación **11-79**, es superior a la presión de operación normal. Esta decisión se ha tomado por seguridad, ya que, si se produjese una sobrepresión en el equipo, éste podría soportarla y no sufriría daños permanentes. El margen que se ha aplicado de sobredimensión es de un 20%.

$$P_D = 1,2 \cdot (P_O + P_H) \quad (11-79)$$

Donde:

- P_D : Presión de diseño (kPa)
- P_O : Presión de operación (kPa)

Determinada la presión y temperatura de diseño se debe pasar a la elección del material de diseño.

- Material

Debido a que las condiciones de operación de cada tanque son diferentes y que en su interior se almacenan compuestos con propiedades también diferentes, no se ha escogido un único material para realizar el diseño de los tanques. Se ha realizado un estudio, según las propiedades y condiciones del fluido almacenado, para determinar cuál es el mejor material según su resistencia y precio. (9)

- Límite Elástico (S)

El límite elástico es la tensión máxima a la que se puede someter un material sin que éste sufra deformaciones permanentes. Esta propiedad es diferente para cada material y depende de la temperatura a la que se encuentre. Su valor es aproximadamente el 25% del esfuerzo último a la tensión del material en cuestión, y está clasificado, como se ha dicho con anterioridad, en función de la temperatura y el material, como se muestra en la **Figura 11-17**. (10)

| Material | Tensile strength (N/mm ²) | Design stress at temperature °C (N/mm ²) | | | | | | | | | |
|--|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 0 to 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Carbon steel (semi-killed or silicon killed) | 360 | 135 | 125 | 115 | 105 | 95 | 85 | 80 | 70 | | |
| Carbon-manganese steel (semi-killed or silicon killed) | 460 | 180 | 170 | 150 | 140 | 130 | 115 | 105 | 100 | | |
| Carbon-molybdenum steel, 0.5 per cent Mo | 450 | 180 | 170 | 145 | 140 | 130 | 120 | 110 | 110 | | |
| Low alloy steel (Ni, Cr, Mo, V) | 550 | 240 | 240 | 240 | 240 | 240 | 235 | 230 | 220 | 190 | 170 |
| Stainless steel 18Cr/8Ni unstabilised (304) | 510 | 165 | 145 | 130 | 115 | 110 | 105 | 100 | 100 | 95 | 90 |
| Stainless steel 18Cr/8Ni Ti stabilised (321) | 540 | 165 | 150 | 140 | 135 | 130 | 130 | 125 | 120 | 120 | 115 |
| Stainless steel 18Cr/8Ni Mo 2½ per cent (316) | 520 | 175 | 150 | 135 | 120 | 115 | 110 | 105 | 105 | 100 | 95 |

Figura 11-17 Valores del límite elástico para diferentes temperaturas según el material

- Eficiencia de las soldaduras (E)

Generalmente los equipos constan de varias láminas unidas por soldaduras. Este hecho provoca que el material más cercano a la soldadura realizada quede debilitado, ofreciendo una menor resistencia elástica en su deformación. Por ello, hay que aplicar un factor de soldadura, que dependerá del tipo y radiografiado de la soldadura, como se observa en la **Error! Reference source not found**.





| TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS | | | | |
|--------------------------|--|--|------------------------------|-----------------------|
| TIPOS NORMA UW-12 | | EFICIENCIA DE LA JUNTA, E Cuando la junta es: | | |
| | | a. Radiogra- fiada total- mente | b. Examinada por zonas | c. No Examinada |
| 1 |  <p>Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.</p> | 1.00 | 0.85 | 0.70 |
| 2 |  <p>Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar</p> <p>En juntas circunferenciales únicamente</p> | 0.90 | 0.80 | 0.65 |
| 3 |  <p>Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo</p> | — | — | 0.60 |
| 4 |  <p>Junta a traslape de doble filete completo</p> | — | — | 0.55 |

Figura 11- 18 Eficacia soldaduras

En este caso se ha optado por una soldadura doble con radiografiado parcial, aplicando un factor de soldadura de 0,85.

- Margen por corrosión (C.A.)

Se debe prever un sobre espesor de la pared y cabezales de los tanques para compensar la corrosión que irá sufriendo el equipo durante su vida útil por seguridad. Para cada uno de los equipos se ha seleccionado un sobre espesor de ¼ pulgadas, es decir de 3,175 mm.

- Factor M

El factor M es un parámetro utilizado para relacionar los radios que forman un cabezal toriesférico y la virola del tanque. En la **Figura 11- 19** se observa la geometría de estos cabezales, y gracias a las **ecuaciones 11-80, 11-81** se puede calcular este factor.

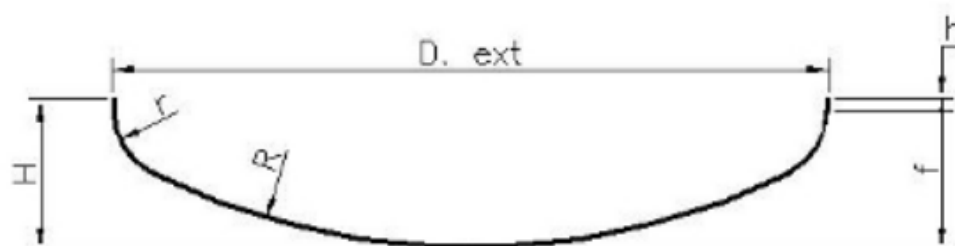


Figura 11- 19 Fondo toriesférico tipo KLOPPER (8)

$$R = D_{int} \quad (11-80)$$

$$r = 0,1 \cdot D_{int} \quad (11-81)$$

Donde:

- D_{int} : Diámetro interno del tanque

Una vez calculados R y r, se calcula la relación R/r y a partir de la tabla que se muestra en la **Figura 11-20**, (10), se encuentra el valor del factor M.

| 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 |
| 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 |
| 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 |

Figura 11-20 Factor M según la relación R/r

Debido al tipo de fondo que se ha escogido en este proyecto, la relación entre los radios siempre es 1, por lo que el factor M siempre será el mismo, con un valor de 1,54.

- Espesor cuerpo cilíndrico
Para al cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico se ha utilizado la siguiente ecuación (10):

$$t_c = \frac{P_D \cdot R_C}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} + C.A. \quad (11-82)$$

Donde:

- t_c : Espesor del cuerpo cilíndrico del tanque (m)
- R_C : Radio interno del tanque (m)
- S: Tensión máxima admisible (kPa)
- C.A.: Margen por corrosión (m)

- Espesor cabezal toriesférico

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se ha utilizado la siguiente ecuación (10):

$$t_F = \frac{P_D \cdot R \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_D} + C \cdot A. \quad (11-83)$$

Donde:

- t_F : Espesor del cabezal toriesférico del tanque (m)
- R: Radio del cabezal (m)
- M: Factor M

- Espesor fondo plano

Para el cálculo del espesor del fondo plano se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$t_{fondo} = 6,5 + C \cdot A. \quad (11-84)$$

- Peso del equipo

El peso de los tanques vacíos se divide en 4 partes: el peso del cuerpo cilíndrico, el peso del cabezal superior, el peso del fondo y el peso del aislante. Teniendo en cuenta que los cabezales son toriesféricos, las expresiones matemáticas para calcular el peso del equipo vacío son:

$$P_E = P_{cil} + P_{cab} + P_{fond} + P_{aisl} \quad (11-85)$$

$$P_{cil} = \pi \cdot H_{cil} \cdot \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{material} \quad (11-86)$$

$$P_{cab} = \frac{1}{12} \cdot \rho_{material} \cdot (D_e^3 - D_i^3) \quad (11-87)$$

$$P_{fond} = \rho_{material} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{int}^2 \cdot t_{fond} \quad (11-88)$$

$$P_{aisl} = \pi \cdot H_{cil} \cdot \left(\left(\frac{D_{eais}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{iaisl}}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{aislante} \quad (11-89)$$

Para el cálculo del peso de los tanques llenos de agua (P_{EF}), se le suma al peso del equipo vacío la masa equivalente de agua que ocupa el volumen del tanque. El valor de la altura del líquido es el mismo que en operación.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int}^2 \cdot H_L \quad (11-90)$$

$$P_{EF} = P_E + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad (11-91)$$

Para el cálculo del peso del equipo en operación, lo único que hay que variar es la densidad del agua de la **ecuación 11.3-18** por la del producto de operación.

11.3.2 Tanque pulmón Cloruro de Hidrógeno (T-202)

El cloruro de hidrógeno procedente de la empresa vecina entrará en un tanque pulmón controlar la presión y el caudal de entrada de este reactivo y así controlar el proceso.

- **Dimensionamiento**

En este primer apartado, se han realizado los cálculos necesarios para determinar el volumen del tanque según la cantidad de producto que se quiera almacenar.

Conociendo el caudal molar que se debe incorporar al proceso, considerando un tiempo de residencia de 5 minutos, se puede encontrar el volumen total que se deberá almacenar en el tanque pulmón mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_m \cdot PM \cdot \tau}{\rho} \quad (11-92)$$

Donde:

- V: Volumen necesario que hay que almacenar (m^3).
- PM: Peso molecular del cloruro de hidrógeno ($kg/kmol$).
- τ : Tiempo de residencia (h)
- Q_m : Caudal molar de la entrada de cloruro de hidrógeno a la planta ($kmol/h$)
- ρ : Densidad de la corriente de cloruro de hidrógeno (kg/m^3)

Para disponer del espacio suficiente y evitar problemas, se sobredimensiona el volumen del tanque un 20%.

Una vez se ha determinado el volumen necesario, se determina el número de tanques y la capacidad de cada uno de ellos. Para este caso, solo se requerirá de uno. Seguidamente se determina la estructura del tanque, ésta será una virola cilíndrica con el fondo inferior plano y el fondo superior toriesférico. Para determinar las dimensiones del tanque, se ha determinado

que la altura de la virola sea 2,5 veces mayor que el diámetro del tanque, y se ha seguido la ecuación siguiente:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{cilindro} \rightarrow V_{cilindro} = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad (11-93)$$

Donde:

- $V_{cilindro}$: Volumen que puede alojar la virola (m³)
- D : Diámetro del tanque (m)
- $H_{cilindro}$: Altura de la virola (m)

Una vez definidas las medidas de la virola, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER (8), como marca la **Figura 11-21**:

Calculadora para dimensionar un fondo toriesferico tipo Kloppe (R=D) segun DIN-28011
Introduzca los datos de Diametro y espesor y pulse el boton 'Calcular'

| Calculadora de fondos KLOPPER | |
|-------------------------------|------|
| Diametro exterior (mm) | 3300 |
| Espesor (mm) | |

fondo Toriesferico Tipo KLOPPER

| | | |
|----------------------|--------|----------|
| Diametro disco (mm) | 3654 | Calcular |
| R (mm) | 3300 | |
| r (mm) | 330 | |
| h (mm) >= | 0 | |
| f (mm) | 639 | |
| H (mm) | 639 | |
| V (sin h) (litros) | 3593.7 | |
| Peso (h minima) (kg) | 0 | |

HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.

Figura 11-21 Calculador de fondos toriesféricos

Resultado dimensionamiento

Tabla 11-25 Resultado dimensionamiento tanque pulmón HCl

| | |
|--|--------------|
| Volumen necesario [V] (m³) | 56,2 |
| Volumen tanque real [V_t] (m³) | 73,9 |
| Diámetro tanque [D] (m) | 3,3 |
| Altura virola [H_{cilindro}] (m) | 8,25 |
| Altura cabezal [H_{tor}] (m) | 0,663 |
| Altura total [H_{tot}] (m) | 8,93 |

Una vez se ha realizado el dimensionamiento y se conocen las medidas que tendrá cada uno de los tanques, se pasa a realizar el diseño mecánico.

Diseño mecánico

En este apartado se presenta en la **Tabla 11-26** cada uno de los parámetros que han sido utilizados para el cálculo del espesor de las paredes y del cabezal toriesférico de los tanques.

Tabla 11-26 Parámetros para calcular el diseño mecánico

| | |
|---|---------------|
| Material de construcción | HDE |
| Temperatura de diseño [T_D] (°C) | 20 |
| Presión hidrostática [P_H] (kPa) | 0,198 |
| Presión de diseño [P_D] (kPa) | 155,6 |
| Límite elástico [S] (kPa) | 27.000 |
| Factor de soldadura [E] | 0,85 |
| Factor M [M] | 1,54 |
| Margen por corrosión [C.A.] (mm) | 3,175 |

Este tanque se ha fabricado de HDPE, polietileno de alta densidad, por temas de seguridad. El cloruro de hidrógeno en sí no es un fluido corrosivo y con un tanque de AISI 316 L ya sería más que suficiente, pero el ácido clorhídrico, que se podría formar al entrar humedad al tanque, no tiene compatibilidad con este tipo de acero inoxidable y acabaría dañando el tanque. Es por eso que se ha escogido como material de fabricación el HDPE, ya que tiene una alta afinidad con el ácido clorhídrico, no presenta problemas de corrosión con él y es un material muy económico.

En la **Tabla 11-27**, se muestra el espesor final de las diferentes partes del tanque.

Tabla 11-27 Espesor del tanque pulmón de cloruro de hidrógeno

| | |
|--|------------|
| Espesor cuerpo cilíndrico [t_c] (cm) | 1,4 |
| Espesor cabezal toriesférico [t_r] (cm) | 2,0 |
| Espesor fondo plano [t_{fondo}] (mm) | 9,7 |

Venteo

Debido a que el cloruro de hidrógeno, en presencia de agua forma gases inflamables, por temas de seguridad se han calculado los parámetros para calcular la capacidad de venteo. En la

Tabla 11- se muestran los resultados de este apartado.

Tabla 11-28 Resultados cálculo venteo

| | |
|---|------------------|
| Área húmeda [A_h] (m²) | 92,4 |
| Calor recibido fuego [Q_f] (kJ/h) | 2.857.705 |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg) | 485,4 |
| Caudal venteo [Q_{vent}] (kg/h) | 5.887 |

Peso del equipo

En la **Figura 11-29**, se muestran los pesos del tanque en las diferentes condiciones.

Figura 11-29 Resultados peso del equipo

| | |
|--|--------------|
| Peso del equipo vacío [P_E] (Tn) | 0,781 |
| Peso del equipo lleno de agua [P_{EF}] (Tn) | 57 |
| Peso del equipo lleno en operación [P_{Op}] (Tn) | 0,95 |

11.3.3 Tanque pulmón Acetileno (T-201)

El acetileno procedente de la empresa vecina entrará en un tanque pulmón para controlar la presión y el caudal de entrada de este reactivo y así controlar el proceso.

- **Dimensionamiento**

En este primer apartado, se han realizado los cálculos necesarios para determinar el volumen del tanque según la cantidad de producto que se quiera almacenar.

Conociendo el caudal molar que se debe incorporar al proceso, considerando un tiempo de residencia de 5 minutos, se puede encontrar el volumen total que se deberá almacenar en el tanque pulmón mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_m \cdot PM \cdot \tau}{\rho} \quad (11-94)$$

Para disponer del espacio suficiente y evitar problemas, se sobredimensiona el volumen del tanque un 20%.

Una vez se ha determinado el volumen necesario, se determina el número de tanques y la capacidad de cada uno de ellos. Para este caso, solo se requerirá de uno. Seguidamente se determina la estructura del tanque, ésta será una virola cilíndrica con el fondo inferior plano y el fondo superior toriesférico. Para determinar las dimensiones del tanque, se ha determinado que la altura de la virola sea 2,5 veces mayor que el diámetro del tanque, y se ha seguido la ecuación siguiente:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{cilindro} \rightarrow V_{cilindro} = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad (11-95)$$

Una vez definidas las medidas de la virola, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER.

Resultado dimensionamiento

Tabla 11-30 Resultado dimensionamiento tanque pulmón acetileno

| | |
|---|--------------|
| Volumen necesario [V] (m3) | 56,3 |
| Volumen tanque real [V_r] (m3) | 74,0 |
| Diámetro tanque [D] (m) | 3,3 |
| Altura virola [H_{cilindro}] (m) | 8,25 |
| Altura cabezal [H_{tor}] (m) | 0,663 |
| Altura total [H_{tot}](m) | 8,93 |

Una vez se ha realizado el dimensionamiento y se conocen las medidas que tendrá cada uno de los tanques, se pasa a realizar el diseño mecánico.

Diseño mecánico

En este apartado se presenta en la **Tabla 11-11** Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico cada uno de los parámetros que han sido utilizados para el cálculo del espesor de las paredes y del cabezal toriesférico de los tanques.

Tabla 11-11 Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico

| Material de construcción | Polipropileno |
|---|----------------------|
| Temperatura de diseño [T_D] (°C) | 20 |
| Presión hidrostática [P_H] (kPa) | 0,141 |
| Presión de diseño [P_D] (kPa) | 155,6 |
| Límite elástico [S] (kPa) | 27.000 |
| Factor de soldadura [E] | 0,85 |
| Factor M [M] | 1,54 |
| Margen por corrosión [C.A.] (mm) | 3,175 |

En la

Tabla 11-3, se muestra el espesor final de las diferentes partes del tanque.

Tabla 11-32 Espesor del tanque pulmón de acetileno

| | |
|--|------------|
| Espesor cuerpo cilíndrico [t_c] (cm) | 1,4 |
| Espesor cabezal toriesférico [t_f] (cm) | 2,0 |
| Espesor fondo plano [t_{fondo}] (mm) | 9,7 |

Venteo

Debido a que el acetileno es un compuesto extremadamente inflamable, por temas de seguridad se han calculado los parámetros para calcular la capacidad de venteo. En la **Tabla 11-33** se muestran los resultados de este apartado.

Tabla 11-33 Resultados cálculo venteo

| | |
|---|-----------|
| Área húmeda [A_h] (m ²) | 92,4 |
| Calor recibido fuego [Q_f] (kJ/h) | 2.857.705 |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg) | 773 |
| Caudal venteo [Q_{vent}] (kg/h) | 3.697 |

Peso del equipo

En la **Tabla 11-34** Error! Reference source not found., se muestran los pesos del tanque en las diferentes condiciones.

Tabla 11-34 Resultados peso del equipo

| | |
|--|-------|
| Peso del equipo vacío [P_E] (Tn) | 0,776 |
| Peso del equipo lleno de agua [P_{EF}] (Tn) | 56 |
| Peso del equipo lleno en operación [P_{Op}] (Tn) | 0,90 |

11.3.4 Tanque almacenamiento condensado columna DC-401 (T-401)

El condensado procedente de la columna DC-401 se introduce en un tanque de almacenamiento de condensador para controlar que el reflujo sea siempre constante y el requerido en cada momento.

- **Dimensionamiento**

En este primer apartado, se han realizado los cálculos necesarios para determinar el volumen del tanque según la cantidad de producto que se quiera almacenar.

Conociendo el caudal molar que se debe incorporar al proceso, considerando un tiempo de residencia de 10 minutos, se puede encontrar el volumen total que se deberá almacenar en el tanque pulmón mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_m \cdot PM \cdot \tau}{\rho} \quad (11-96)$$

Para disponer del espacio suficiente y evitar problemas, se sobredimensiona el volumen del tanque un 20%.

Una vez se ha determinado el volumen necesario, se determina el número de tanques y la capacidad de cada uno de ellos. Para este caso, solo se requerirá de uno. Seguidamente se determina la estructura del tanque, ésta será una virola cilíndrica con el fondo superior e inferior toriesférico. Para determinar las dimensiones del tanque, se ha determinado que la altura de la virola sea 2,5 veces mayor que el diámetro del tanque, y se ha seguido la ecuación siguiente:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{cilindro} \rightarrow V_{cilindro} = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad (11-97)$$

Una vez definidas las medidas de la virola, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER.

Resultado dimensionamiento

Tabla 11-35 Resultado dimensionamiento tanque pulmón acetileno

| | |
|---|--------------|
| Volumen necesario [V] (m3) | 1,35 |
| Volumen tanque real [V_t] (m3) | 1,87 |
| Diámetro tanque [D] (m) | 0,95 |
| Altura virola [H_{cilindro}] (m) | 2,4 |
| Altura cabezal [H_{tor}] (m) | 0,196 |
| Altura total [H_{tot}](m) | 2,79 |

Una vez se ha realizado el dimensionamiento y se conocen las medidas que tendrá cada uno de los tanques, se pasa a realizar el diseño mecánico.

Diseño mecánico

En este apartado se presenta en la **Tabla 11-36**, cada uno de los parámetros que han sido utilizados para el cálculo del espesor de las paredes y del cabezal toriesférico de los tanques.

Tabla 11-36 Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico

| | |
|---|----------------------------|
| Material de construcción | AISI 316 L + HALAR® |
| Temperatura de diseño [T_D] (°C) | 10,7 |
| Presión hidrostática [P_H] (kPa) | 6,98 |
| Presión de diseño [P_D] (kPa) | 227,7 |
| Límite elástico [S] (kPa) | 175.000 |
| Factor de soldadura [E] | 0,85 |
| Factor M [M] | 1,54 |
| Margen por corrosión [C.A.] (mm) | 3,175 |

Este tanque se ha fabricado de AISI 316 L porque aguanta bien la corrosión que puedan provocar los fluidos que circulan por ellas. Aun así, dicho tanque se ha recubierto del material HALAR® para aumentar la resistencia a la corrosión. Se ha tomado esta precaución porque estos equipos se podrían corroer si entrase humedad en ellos y se formase una pequeña cantidad de ácido clorhídrico que atacaría las paredes de AISI 316 L.

En la **Tabla 11-37**, se muestra el espesor final de las diferentes partes del tanque.

Tabla 11-37 Espesor del tanque T-401

| | |
|---|------------|
| Espesor cuerpo cilíndrico [t_c] (mm) | 3,9 |
| Espesor cabezales toriesféricos [t_F] (mm) | 4,3 |

Venteo

Debido a que el condensado contiene compuestos que son altamente inflamables, por temas de seguridad se han calculado los parámetros para calcular la capacidad de venteo. En la **Tabla 11-38** se muestran los resultados de este apartado.

Tabla 11-38 Resultados cálculo venteo

| | |
|--|----------------|
| Área húmeda [A_h] (m²) | 5,7 |
| Calor recibido fuego [Q_f] (kJ/h) | 582.122 |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg) | 327,9 |
| Caudal venteo [Q_{vent}] (kg/h) | 1.775,3 |

Peso del equipo

En la **Tabla 11-39**, se muestran los pesos del tanque en las diferentes condiciones.

Tabla 11-39 Resultados peso del equipo

| | |
|---|--------------|
| Peso del equipo vacío [P_E] (kg) | 271,3 |
| Peso del equipo lleno de agua [P_{EF}] (Tn) | 1,35 |
| Peso del equipo lleno en operación [P_{Op}] (Tn) | 1,28 |

Cubeto

Para mantener un líquido en caso de derrame o fuga la instrucción complementaria MIE-APQ1, según el tipo de fluido que hay en nuestra planta, determina que hay que construir cubetos a distancia con una capacidad de un 20% la capacidad global del recipiente, con una altura de 1 metro al tratarse de cubetos de obra. Una vez determinado el volumen del cubeto, con la siguiente ecuación se determina la largada de éste para acabar de dimensionarlo.

$$L_{cubeto} = \sqrt{\frac{V_{cubeto}}{H_{cubeto}}} \quad (11-98)$$

Donde:

- L_{cubeto}: Longitud paredes del cubeto (m)
- V_{cubeto}: Volumen que es capaz de almacenar el cubeto (m³)
- H_{cubeto}: Altura de las paredes del cubeto (m)

Cabe añadir que dicho cubeto estará techado para tener la menor superficie libre disponible. En la **Tabla 11-40**, se muestran los datos del dimensionamiento del cubeto a distancia.

Tabla 11-40 Dimensionamiento cubeto tanque condensados DC-401

| | |
|---|--------------|
| Volumen almacenaje cubeto [V_{cubeto}] (m³) | 0,374 |
| Altura paredes cubeto [H_{cubeto}] (m) | 1 |
| Longitud paredes cubeto [L_{cubeto}] (m) | 0,615 |

11.3.5 Tanque pulmón entre las dos columnas (T-402)

La corriente de salida por cabezas, de la columna D-401, se introduce en un tanque pulmón para controlar que el caudal de entrada a la siguiente columna, D-501, sea siempre constante y circule a la presión deseada en cada momento.

- **Dimensionamiento**

En este primer apartado, se han realizado los cálculos necesarios para determinar el volumen del tanque según la cantidad de producto que se quiera almacenar.

Conociendo el caudal molar que sale de la columna, considerando un tiempo de residencia de 15 minutos, se puede encontrar el volumen total que se deberá almacenar en el tanque pulmón mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_m \cdot PM \cdot \tau}{\rho} \quad (11-99)$$

Para disponer del espacio suficiente y evitar problemas, se sobredimensiona el volumen del tanque un 20%.

Una vez se ha determinado el volumen necesario, se determina el número de tanques y la capacidad de cada uno de ellos. Para este caso, solo se requerirá de uno. Seguidamente se determina la estructura del tanque, ésta será una virola cilíndrica con el fondo superior e inferior toriesférico. Para determinar las dimensiones del tanque, se ha determinado que la altura de la virola sea 2,5 veces mayor que el diámetro del tanque, y se ha seguido la ecuación siguiente:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{cilindro} \rightarrow V_{cilindro} = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad (11-100)$$

Una vez definidas las medidas de la virola, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER.

Resultado dimensionamiento

Tabla 11-41 Resultado dimensionamiento tanque pulmón entre columnas

| | |
|---|--------------|
| Volumen necesario [V] (m3) | 0,675 |
| Volumen tanque real [V_t] (m3) | 0,94 |
| Diámetro tanque [D] (m) | 0,76 |
| Altura virola [H_{cilindro}] (m) | 1,94 |
| Altura cabezal [H_{tor}] (m) | 0,147 |
| Altura total [H_{tot}](m) | 2,19 |

Una vez se ha realizado el dimensionamiento y se conocen las medidas que tendrá cada uno de los tanques, se pasa a realizar el diseño mecánico.

Diseño mecánico

En este apartado se presenta en la **Tabla-42**, cada uno de los parámetros que han sido utilizados para el cálculo del espesor de las paredes y del cabezal toriesférico de los tanques.

Tabla-42 Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico

| Material de construcción | AISI 316 L + HALAR® |
|--------------------------------------|---------------------|
| Temperatura de diseño [T_D] (°C) | 10,7 |
| Presión hidrostática [P_H] (kPa) | 5,6 |
| Presión de diseño [P_D] (kPa) | 226,2 |
| Límite elástico [S] (kPa) | 175.000 |
| Factor de soldadura [E] | 0,85 |
| Factor M [M] | 1,54 |
| Margen por corrosión [C.A.] (mm) | 3,175 |

Este tanque se ha fabricado de AISI 316 L porque aguanta bien la corrosión que puedan provocar los fluidos que circulan por ellas. Aun así, dicho tanque se ha recubierto del material HALAR® para aumentar la resistencia a la corrosión. Se ha tomado esta precaución porque estos equipos se podrían corroer si entrase humedad en ellos y se formase una pequeña cantidad de ácido clorhídrico que atacaría las paredes de AISI 316 L.

En la **Tabla 11-43**, se muestra el espesor final de las diferentes partes del tanque.

Tabla 11-43 Espesor del tanque T-402

| | |
|--|------|
| Espesor cuerpo cilíndrico [t_c] (mm) | 3,75 |
| Espesor cabezales toriesféricos [t_f] (mm) | 4,1 |

Venteo

Debido a que el condensado contiene compuestos que son altamente inflamables, por temas de seguridad se han calculado los parámetros para calcular la capacidad de venteo. En la

Tabla 11-44 se muestran los resultados de este apartado.

Tabla 11-44 Resultados cálculo venteo

| | |
|---|---------|
| Área húmeda [A_h] (m ²) | 4,54 |
| Calor recibido fuego [Q_f] (kJ/h) | 483.039 |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg) | 327,9 |
| Caudal venteo [Q_{vent}] (kg/h) | 1.473 |

Peso del equipo

En la **Tabla 11-45**, se muestran los pesos del tanque en las diferentes condiciones.

Tabla 11-45 Resultados peso del equipo

| | |
|--|-------|
| Peso del equipo vacío [P_E] (kg) | 165,8 |
| Peso del equipo lleno de agua [P_{EF}] (Tn) | 0,843 |
| Peso del equipo lleno en operación [P_{Op}] (Tn) | 0,804 |

Cubeto

Para mantener un líquido en caso de derrame o fuga la instrucción complementaria MIE-APQ1, según el tipo de fluido que hay en nuestra planta, determina que hay que construir cubetos a distancia con una capacidad de un 20% la capacidad global del recipiente, con una altura de 1 metro al tratarse de cubetos de obra. Una vez determinado el volumen del cubeto, con la siguiente ecuación se determina la largada de éste para acabar de dimensionarlo.

$$L_{cubeto} = \sqrt{\frac{V_{cubeto}}{H_{cubeto}}} \quad (11-101)$$

Donde:

- L_{cubeto} : Longitud paredes del cubeto (m)
- V_{cubeto} : Volumen que es capaz de almacenar el cubeto (m³)
- H_{cubeto} : Altura de las paredes del cubeto (m)

Cabe añadir que dicho cubeto estará techado para tener la menor superficie libre disponible. En la **Tabla 11-46**, se muestran los datos del dimensionamiento del cubeto a distancia.

Tabla 11-46 Dimensionamiento cubeto tanque T-402

| | |
|--|--------------|
| Volumen almacenaje cubeto [V_{cubeto}] (m³) | 0,188 |
| Altura paredes cubeto [H_{cubeto}] (m) | 1 |
| Longitud paredes cubeto [L_{cubeto}] (m) | 0,43 |

11.3.6 Tanque almacenamiento condensado columna DC-501 (T-501)

El condensado procedente de la columna DC-501 se introduce en un tanque de almacenamiento de condensador para controlar que el reflujo sea siempre constante y el requerido en cada momento.

• Dimensionamiento

En este primer apartado, se han realizado los cálculos necesarios para determinar el volumen del tanque según la cantidad de producto que se quiera almacenar.

Conociendo el caudal molar que sale de la columna, considerando un tiempo de residencia de 10 minutos, se puede encontrar el volumen total que se deberá almacenar en el tanque pulmón mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_m \cdot PM \cdot \tau}{\rho} \quad (11-102)$$

Para disponer del espacio suficiente y evitar problemas, se sobredimensiona el volumen del tanque un 20%.

Una vez se ha determinado el volumen necesario, se determina el número de tanques y la capacidad de cada uno de ellos. Para este caso, solo se requerirá de uno. Seguidamente se determina la estructura del tanque, ésta será una virola cilíndrica con el fondo superior e inferior toriesférico. Para determinar las dimensiones del tanque, se ha determinado que la altura de la virola sea 2,5 veces mayor que el diámetro del tanque, y se ha seguido la ecuación siguiente:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{cilindro} \rightarrow V_{cilindro} = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad (11-103)$$

Una vez definidas las medidas de la virola, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER.

Resultado dimensionamiento

Tabla 11-47 Resultado dimensionamiento tanque T-501

| | |
|---|--------------|
| Volumen necesario [V] (m3) | 0,05 |
| Volumen tanque real [V_t] (m3) | 0,069 |
| Diámetro tanque [D] (m) | 0,32 |
| Altura virola [H_{cilindro}] (m) | 0,8 |
| Altura cabezal [H_{tor}] (m) | 0,083 |
| Altura total [H_{tot}](m) | 0,97 |

Una vez se ha realizado el dimensionamiento y se conocen las medidas que tendrá cada uno de los tanques, se pasa a realizar el diseño mecánico.

Diseño mecánico

En este apartado se presenta en la **Tabla 11-48** Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico, cada uno de los parámetros que han sido utilizados para el cálculo del espesor de las paredes y del cabezal toriesférico de los tanques.

Tabla 11-48 Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico

| Material de construcción | AISI 316 L + HALAR® |
|---|----------------------------|
| Temperatura de diseño [T_D] (°C) | -21,8 |
| Presión hidrostática [P_H] (kPa) | 1,4 |
| Presión de diseño [P_D] (kPa) | 1.340 |
| Límite elástico [S] (kPa) | 175.000 |
| Factor de soldadura [E] | 0,85 |
| Factor M [M] | 1,54 |
| Margen por corrosión [C.A.] (mm) | 3,175 |

Este tanque se ha fabricado de AISI 316 L porque aguanta bien la corrosión que puedan provocar los fluidos que circulan por ellas. Aun así, dicho tanque se ha recubierto del material HALAR® para aumentar la resistencia a la corrosión. Se ha tomado esta precaución

porque estos equipos se podrían corroer si entrase humedad en ellos y se formase una pequeña cantidad de ácido clorhídrico que atacaría las paredes de AISI 316 L.

En la **Tabla 11-49**, se muestra el espesor final de las diferentes partes del tanque.

Tabla 11-49 Espesor del tanque T-501

| | |
|--|------------|
| Espesor cuerpo cilíndrico [t_c] (mm) | 4,6 |
| Espesor cabezales toriesféricos [t_F] (mm) | 5,4 |

Venteo

Debido a que el condensado contiene compuestos que son altamente inflamables, por temas de seguridad se han calculado los parámetros para calcular la capacidad de venteo. En la **Tabla 11-50** Resultados cálculo venteo se muestran los resultados de este apartado.

Tabla 11-50 Resultados cálculo venteo

| | |
|---|----------------|
| Área húmeda [A_h] (m²) | 0,74 |
| Calor recibido fuego [Q_f] (kJ/h) | 109.136 |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg) | 483,9 |
| Caudal venteo [Q_{vent}] (kg/h) | 225,5 |

Peso del equipo

En la **Tabla 11-51**, se muestran los pesos del tanque en las diferentes condiciones.

Tabla 11-51 Resultados peso del equipo

| | |
|--|-------------|
| Peso del equipo vacío [P_E] (kg) | 36,4 |
| Peso del equipo lleno de agua [P_{EF}] (kg) | 86,5 |
| Peso del equipo lleno en operación [P_{Op}] (kg) | 88,8 |

Cubeto

Para mantener un líquido en caso de derrame o fuga la instrucción complementaria MIE-APQ1, según el tipo de fluido que hay en nuestra planta, determina que hay que construir cubetos a distancia con una capacidad de un 20% la capacidad global del recipiente, con una altura de 1 metro al tratarse de cubetos de obra. Una vez determinado el volumen del cubeto, con la siguiente ecuación se determina la largada de éste para acabar de dimensionarlo.

$$L_{cubeto} = \sqrt{\frac{V_{cubeto}}{H_{cubeto}}} \quad (11-104)$$

Donde:

- L_{cubeto} : Longitud paredes del cubeto (m)
- V_{cubeto} : Volumen que es capaz de almacenar el cubeto (m³)
- H_{cubeto} : Altura de las paredes del cubeto (m)

Cabe añadir que dicho cubeto estará techado para tener la menor superficie libre disponible. En la **Tabla 11-53**, se muestran los datos del dimensionamiento del cubeto a distancia.

Tabla 11-53 Dimensionamiento cubeto tanque T-501

| | |
|--|---------------|
| Volumen almacenaje cubeto [V_{cubeto}] (m3) | 0,0138 |
| Altura paredes cubeto [H_{cubeto}] (m) | 1 |
| Longitud paredes cubeto [L_{cubeto}] (m) | 0,12 |

11.3.7 Tanque almacenaje corriente M05 (T-602 A / B)

La corriente de salida por fondo de la columna DC-501 se introduce en un tanque de almacenamiento antes de que vengan a recogerlo.

- Dimensionamiento**

En este primer apartado, se han realizado los cálculos necesarios para determinar el volumen del tanque según la cantidad de producto que se quiera almacenar.

Conociendo el caudal molar que sale de la columna, considerando un tiempo de stock de 3 días, se puede encontrar el volumen total que se deberá almacenar en el tanque pulmón mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_m \cdot PM \cdot t_s}{\rho} \quad (11-106)$$

Donde:

- t_s : Tiempo de stock del compuesto almacenado (h)

Para disponer del espacio suficiente y evitar problemas, se sobredimensiona el volumen del tanque un 20%.

Una vez se ha determinado el volumen necesario, se determina el número de tanques y la capacidad de cada uno de ellos. Para este caso, solo se requerirá de uno. Seguidamente se determina la estructura del tanque, ésta será una virola cilíndrica con el fondo superior toriesférico y el fondo plano. Para determinar las dimensiones del tanque, se ha determinado que la altura de la virola sea 2,5 veces mayor que el diámetro del tanque, y se ha seguido la ecuación siguiente:

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{\text{cilindro}} \rightarrow V_{\text{cilindro}} = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad (11-107)$$

Una vez definidas las medidas de la virola, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER.

Resultado dimensionamiento

Tabla 11-54 Resultado dimensionamiento tanque T-602

| | |
|---|-------------|
| Volumen necesario [V] (m3) | 5,1 |
| Volumen tanque real [V_t] (m3) | 6,74 |
| Diámetro tanque [D] (m) | 1,5 |
| Altura virola [H_{cilindro}] (m) | 3,75 |
| Altura cabezal [H_{tor}] (m) | 0,29 |
| Altura total [H_{tot}](m) | 4,04 |

Una vez se ha realizado el dimensionamiento y se conocen las medidas que tendrá cada uno de los tanques, se pasa a realizar el diseño mecánico.

Diseño mecánico

En este apartado se presenta en la **Tabla 11-55**, cada uno de los parámetros que han sido utilizados para el cálculo del espesor de las paredes y del cabezal toriesférico de los tanques.

Tabla 11-55 Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico

| Material de construcción | AISI 316 L + HALAR® |
|---|----------------------------|
| Temperatura de diseño [T_D] (°C) | 31,9 |
| Presión hidrostática [P_H] (kPa) | 54,5 |
| Presión de diseño [P_D] (kPa) | 280 |
| Límite elástico [S] (kPa) | 175.000 |
| Factor de soldadura [E] | 0,85 |
| Factor M [M] | 1,54 |
| Margen por corrosión [C.A.] (mm) | 3,175 |

Este tanque se ha fabricado de AISI 316 L porque aguanta bien la corrosión que puedan provocar los fluidos que circulan por ellas. Aun así, dicho tanque se ha recubierto del material HALAR® para aumentar la resistencia a la corrosión. Se ha tomado esta precaución porque en este equipo se almacena entre otros productos 1,2-dicloroetano, que provoca una ligera corrosión y decoloración en el AISI 316 L.

En la **Tabla 11-5**, se muestra el espesor final de las diferentes partes del tanque.

Tabla 11-56 Espesor del tanque T-602

| | |
|--|-------------|
| Espesor cuerpo cilíndrico [t_c] (mm) | 4,6 |
| Espesor cabezal toriesférico [t_F] (mm) | 5,35 |
| Espesor fondo plano [t_{fondo}] (mm) | 9,53 |

Venteo

Debido a que el condensado contiene compuestos que son altamente inflamables, por temas de seguridad se han calculado los parámetros para calcular la capacidad de venteo. En la **Tabla 11-57** se muestran los resultados de este apartado.

Tabla 11-57 Resultados cálculo venteo

| | |
|--|------------------|
| Área húmeda [A_h] (m²) | 19 |
| Calor recibido fuego [Q_f] (kJ/h) | 1.565.000 |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg) | 306,6 |
| Caudal venteo [Q_{vent}] (kg/h) | 5.104,4 |

Peso del equipo

En la **Tabla 11-58**, se muestran los pesos del tanque en las diferentes condiciones.

Tabla 11-58 Resultados peso del equipo

| | |
|---|-------------|
| Peso del equipo vacío [P_E] (kg) | 816 |
| Peso del equipo lleno de agua [P_{EF}] (Tn) | 5,89 |
| Peso del equipo lleno en operación [P_{Op}] (Tn) | 7,82 |

Cubeto

Para mantener un líquido en caso de derrame o fuga la instrucción complementaria MIE-APQ1, según el tipo de fluido que hay en nuestra planta, determina que hay que construir cubetos a distancia con una capacidad de un 20% la capacidad global del recipiente, con una altura de 1 metro al tratarse de cubetos de obra. Una vez determinado el volumen del cubeto, con la siguiente ecuación se determina la largada de éste para acabar de dimensionarlo.

$$L_{cubeto} = \sqrt{\frac{V_{cubeto}}{H_{cubeto}}} \quad (11-108)$$

Donde:

- L_{cubeto}: Longitud paredes del cubeto (m)
- V_{cubeto}: Volumen que es capaz de almacenar el cubeto (m³)
- H_{cubeto}: Altura de las paredes del cubeto (m)

Cabe añadir que dicho cubeto estará techado para tener la menor superficie libre disponible. En la **Tabla 11-59**, se muestran los datos del dimensionamiento del cubeto a distancia.

Tabla 11-59 Dimensionamiento cubeto tanque T-602

| | |
|---|-------------|
| Volumen almacenaje cubeto [V_{cubeto}] (m³) | 1,35 |
| Altura paredes cubeto [H_{cubeto}] (m) | 1 |
| Longitud paredes cubeto [L_{cubeto}] (m) | 1,16 |

11.3.8 Tanque almacenaje producto (T-601 A / B)

La corriente de salida por fondo de la columna DC-601 se introduce en un tanque de almacenamiento antes de que sea vendido a otras empresas.

- **Dimensionamiento**

En este primer apartado, se han realizado los cálculos necesarios para determinar el volumen del tanque según la cantidad de producto que se quiera almacenar.

Conociendo el caudal molar que sale de la columna, considerando un tiempo de stock de 3 días, se puede encontrar el volumen total que se deberá almacenar en el tanque pulmón mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_m \cdot PM \cdot t_s}{\rho} \quad (11-109)$$

Donde:

- t_s : Tiempo de stock del compuesto almacenado (h)

Para disponer del espacio suficiente y evitar problemas, se sobredimensiona el volumen del tanque un 20%.

Una vez se ha determinado el volumen necesario, se determina el número de tanques y la capacidad de cada uno de ellos. Para este caso, solo se requerirá de uno. Seguidamente se determina la estructura del tanque, ésta será una virola cilíndrica con el fondo superior toriesférico y el fondo plano. Para determinar las dimensiones del tanque, se ha determinado que la altura de la virola sea 2,5 veces mayor que el diámetro del tanque, y se ha seguido la ecuación siguiente:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{cilindro} \rightarrow V_{cilindro} = 2,5 \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad (11-110)$$

Una vez definidas las medidas de la virola, se pasa a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, para ello se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER.

Resultado dimensionamiento

Tabla 11-60 Resultado dimensionamiento tanque T-601

| | |
|---|--------------|
| Volumen necesario [V] (m3) | 100,8 |
| Volumen tanque real [V_t] (m3) | 132,4 |
| Diámetro tanque [D] (m) | 4 |
| Altura virola [H_{cilindro}] (m) | 10 |
| Altura cabezal [H_{tor}] (m) | 0,77 |
| Altura total [H_{tot}](m) | 10,77 |

Una vez se ha realizado el dimensionamiento y se conocen las medidas que tendrá cada uno de los tanques, se pasa a realizar el diseño mecánico.

Diseño mecánico

En este apartado se presenta en la **Tabla 11-61**, cada uno de los parámetros que han sido utilizados para el cálculo del espesor de las paredes y del cabezal toriesférico de los tanques.

Tabla 11-61 Parámetros calculados para realizar el diseño mecánico

| Material de construcción | AISI 316 L + HALAR® |
|--------------------------------------|---------------------|
| Temperatura de diseño [T_D] (°C) | 43 |
| Presión hidrostática [P_H] (kPa) | 94,6 |
| Presión de diseño [P_D] (kPa) | 884,3 |
| Límite elástico [S] (kPa) | 175.000 |
| Factor de soldadura [E] | 0,85 |
| Factor M [M] | 1,54 |
| Margen por corrosión [C.A.] (mm) | 3,175 |

Este tanque se ha fabricado de AISI 316 L porque aguanta bien la corrosión que puedan provocar los fluidos que circulan por ellas. Aun así, dicho tanque se ha recubierto del material HALAR® para aumentar la resistencia a la corrosión. En principio, en este tanque se almacena una cantidad muy pequeña de cloruro de hidrógeno y nada de 1,2-dicloroetileno, por lo que no tendría que haber ningún problema, pero por precaución y por la puesta en marcha, hay que tener en cuenta que en ciertos momentos pueden llegar grandes cantidades de estos dos productos. Como justo se acaba de comentar, es por eso que se ha decidido recubrir el tanque con HALAR®.

En la **Tabla 11-62**, se muestra el espesor final de las diferentes partes del tanque.

Tabla 11-62 Espesor del tanque T-601

| | |
|---|------|
| Espesor cuerpo cilíndrico [t_c] (mm) | 15,3 |
| Espesor cabezal toriesférico [t_f] (mm) | 18,6 |
| Espesor fondo plano [t_{fondo}] (mm) | 9,53 |

Venteo

Debido a que el condensado contiene compuestos que son altamente inflamables, por temas de seguridad se han calculado los parámetros para calcular la capacidad de venteo. En la **Tabla 11-63** se muestran los resultados de este apartado.

Tabla 11-63 Resultados cálculo venteo

| | |
|---|-----------|
| Área húmeda [A_h] (m ²) | 135,3 |
| Calor recibido fuego [Q_f] (kJ/h) | 3.906.884 |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg) | 292,6 |
| Caudal venteo [Q_{vent}] (kg/h) | 13.352 |

Peso del equipo

En la **Tabla 11-64**, se muestran los pesos del tanque en las diferentes condiciones.

Tabla 11-64 Resultados peso del equipo

| | |
|--|--------------|
| Peso del equipo vacío [P_E] (Tn) | 16,8 |
| Peso del equipo lleno de agua [P_{EF}] (Tn) | 122,7 |
| Peso del equipo lleno en operación [P_{Op}] (Tn) | 111,2 |

Cubeto

Para mantener un líquido en caso de derrame o fuga la instrucción complementaria MIE-APQ1, según el tipo de fluido que hay en nuestra planta, determina que hay que construir cubetos a distancia con una capacidad de un 20% la capacidad global del recipiente, con una altura de 1 metro al tratarse de cubetos de obra. Una vez determinado el volumen del cubeto, con la siguiente ecuación se determina la largada de éste para acabar de dimensionarlo.

$$L_{cubeto} = \sqrt{\frac{V_{cubeto}}{H_{cubeto}}} \quad (11-111)$$

Donde:

- L_{cubeto} : Longitud paredes del cubeto (m)
- V_{cubeto} : Volumen que es capaz de almacenar el cubeto (m³)
- H_{cubeto} : Altura de las paredes del cubeto (m)

Cabe añadir que dicho cubeto estará techado para tener la menor superficie libre disponible. En la **Tabla 11-65**, se muestran los datos del dimensionamiento del cubeto a distancia.

Tabla 11-65 Dimensionamiento cubeto tanque T-601

| | |
|---|-------------|
| Volumen almacenaje cubeto [V_{cubeto}] (m3) | 26,5 |
| Altura paredes cubeto [H_{cubeto}] (m) | 1 |
| Longitud paredes cubeto [L_{cubeto}] (m) | 5,2 |

Diseño energético

Uno de los principales problemas que presenta el almacenaje del cloruro de vinilo es mantenerlo en estado líquido, provocando en verano problemas de gasificación del reactivo.

Para mantener el cloruro de vinilo en estado líquido se dispone de un sistema de calorifugado. Para calcular las pérdidas de calor producidas por el sistema se tienen que hallar los coeficientes individuales de transmisión de calor para el aire, agua y líquidos orgánicos encontrado en el libro "Perry's Chemical Engineer Handbook". A partir de la siguiente ecuación se determina el coeficiente individual de transferencia de calor tanto para el producto como para el aire:

$$h = b \cdot (\Delta T)^m \cdot L^{3m-1} \quad (11-112)$$

Donde:

- h: Coeficiente individual del cloruro de vinilo o aire (W/m²·°C)
- ΔT: Incremento de temperatura (°C)
- b y m: Parámetros característicos de cada compuesto procedentes del "Perry's"
- L: Altura del tanque (m)

En la **Tabla 11-66**, se muestra el valor de las constantes para el cálculo de los coeficientes individuales a aplicar en la **ecuación 11-112** y el valor de este coeficiente.

Tabla 11-66 Cálculo coeficiente individual

| Compuesto | b | m | L | h (W/m ² ·°C) |
|--------------------------|------|------|-------|--------------------------|
| Cloruro de vinilo | 59 | 0,25 | 10,77 | 60,6 |
| Aire | 1,24 | 0,33 | 10,77 | 4,26 |

Una vez se han calculado los coeficientes individuales de transferencia de calor, se pasa a la determinación del coeficiente global de transferencia de calor por convección (U). Para este cálculo se han escogido las condiciones más adversas de temperatura registradas en Sabadell, 40°C. El cálculo de este coeficiente se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i \cdot \frac{D_i}{D_o}} + \frac{1}{h_e \cdot \frac{D_o}{D_i}} + \frac{\Delta x_{cilindro}}{k_{mat} \cdot \frac{D_{ml_{cilindro}}}{D_i}} + \frac{\Delta x_{aislante}}{k_{aislante} \cdot \frac{D_{ml_{aislante}}}{D_i}} \right)} = 1,17 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (11-113)$$

Donde:

- U: Coeficiente global de transferencia de calor (W/m²·°C)
- h_i: Coeficiente individual de transferencia de calor cloruro de vinilo (W/m²·°C)
- h_e: Coeficiente individual de transferencia del aire (W/m²·°C)
- Δx_{cilindro}: Espesor del cilindro (m)
- Δx_{aislante}: Espesor del aislante (m): 30 mm
- D_{ml}: Diámetro medio logarítmico según el diámetro interno y externo del cilindro y aislante (m)
- k_{mat}: Conductividad térmica del material del tanque: 16,3 (W/m²·°C)
- k_{aislante}: Conductividad térmica del aislante: 0,036 (W/m²·°C)

Seguidamente se calcula el área de intercambio de calor, que será la del fondo superior y la virola, según la siguiente ecuación:

$$A_{int} = A_{virola} + A_{tor} \quad (11-114)$$

$$A_{int} = \pi \cdot Di \cdot H_C + \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 + 0,02 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 \quad (11-115)$$

Donde:

- A_{int} : Área total de intercambio de calor (m^2)
- A_{virola} : Área de intercambio de la virola del tanque (m^2)
- A_{tor} : Área de intercambio del cabezal superior (m^2)
- Di : Diámetro interno del cilindro (m)
- H_C : Altura de la pared cilíndrica (m)

Se obtiene un área de intercambio total de 148,2 m^2 .

A continuación, se calcula el caudal máximo de calor a intercambiar, éste se mide con la siguiente ecuación:

$$q = U \cdot A_{int} \cdot \Delta T \quad (11-116)$$

Donde:

- ΔT : Incremento de temperaturas en el peor caso, siendo la temperatura externa de 40°C y la interna de 28°C.

De la **ecuación 11-116**, se obtiene que $q = 2.080,7$ W.

Con este valor, se pasa a calcular el caudal de refrigerante necesario, sabiendo que el calor a intercambiar en el peor de los casos tiene que ser igual que el calor que se quiere retirar. Por lo tanto, con la siguiente ecuación se calcula el caudal de refrigerante necesario:

$$m = \frac{q}{C_p \cdot \Delta T} \quad (11-117)$$

Donde:

- m : Caudal de refrigerante (kg/h)
- q : calor a intercambiar (W)
- ΔT : Diferencia de temperaturas del refrigerante, en este caso el agua entra a 15 y sale a 25°C (°C)
- C_p : Calor específica del agua: 4180 (J/kg°C)

El caudal de refrigerante (m) calculado es de 180 kg/h, o lo que es lo mismo 0,18 m³/h.

A continuación, se calculan las características del serpentín, como en primer lugar, el área del serpentín, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{U \cdot DTML}{q} \quad (11-118)$$

$$DTML = \frac{(T - T_e) - (T - T_s)}{\ln\left(\frac{T - T_e}{T - T_s}\right)} \quad (11-119)$$

Donde:

- q: Calor a intercambiar (W)
- A: Área del serpentín (m²)
- U: Coeficiente global de transferencia de calor entre el serpentín y el producto, y para el cloruro de vinilo los valores bibliográficos toman valores de 300 (W/m²·°C)
- DTML: Temperatura media logarítmica de las temperaturas calculada a partir de la **ecuación 11-119**.
- T: Temperatura a la que se quiere mantener el tanque (28 °C)
- T_e: Temperatura de entrada del refrigerante (5°C)
- T_s: Temperatura de salida del refrigerante (15°C)

Las vueltas que da el serpentín se han calculado a partir de las siguientes ecuaciones:

$$D_{tubo} = \sqrt{\frac{Qv}{\frac{\pi}{4} \cdot v_{pas}}} \quad (11-120)$$

$$L_{tubo} = \frac{A}{D_{tubo} \cdot \pi} \quad (11-121)$$

$$n^{\circ} vueltas = \frac{L_{tubo}}{D_{tubo} + Dist.tubos} \quad (11-122)$$

Donde:

- D_{tubo}: Diámetro del tubo del serpentín (m): 0,57 m
- Qv: Caudal volumétrico del agua de refrigeración (m³/h): 0,18 m³/h
- v_{pas}: Velocidad de paso del agua por el serpentín (m/s): 1,5 m/s
- L_{tubo}: Longitud del serpentín (m): 1,41 m
- N° vueltas: Número de vueltas que da el serpentín en el tanque: 2 vueltas
- Dist_{tubos}: Distancia entre las vueltas del serpentín (m): 0,3 m

11.3.9 Silo para el carbón activo y el catalizador

Se ha decidido instalar un silo de almacenaje para el preparado de carbón activo y catalizador. Se ha determinado que se almacenarán dos terceras partes del preparado que se contiene en los 3 reactores que están en operación, ya que, si por alguna razón éste se dañara, se tendría preparado para dos reactores más el del cuarto reactor que no está operativo. Una vez calculada esta masa, con la densidad del preparado se encuentra el volumen total necesario.

$$W_{alm} = \frac{2}{3} \cdot W \quad (11-123)$$

$$V_{alm} = W_{alm} \cdot \rho_{prep} \quad (11-124)$$

Donde:

- W: Peso catalizador más carbón activo en los reactores operativos (kg)
- W_{alm} : Peso preparado a almacenar (kg): 7.700 kg
- ρ_{prep} : Densidad del preparado de carbón activo y catalizador (kg/m³)
- V_{alm} : Volumen de preparado a almacenar (m³): 8,2 m³

Debido a las dimensiones del silo se ha determinado que no hace falta distribuir la carga de preparado en más de un silo y por lo tanto se adquirirá solo uno. Cabe añadir, que se ha decidido comprar un silo de 15 m³, por dos motivos, en primer lugar, por si algún día se decide almacenar la carga de los tres tanques y, en segundo lugar, para tener un margen de seguridad.

Una vez encontrada la capacidad que debe tener el silo, se ha optado por un tanque de la empresa LAPESA (11), empresa especializada en la fabricación de depósitos y recipientes a presión. Analizando su catálogo, se ha optado por el silo metálico de chapa lisa con estructura soporte, modelo IE-15. En la **Figura 11-22**, se muestra el plano del recipiente.

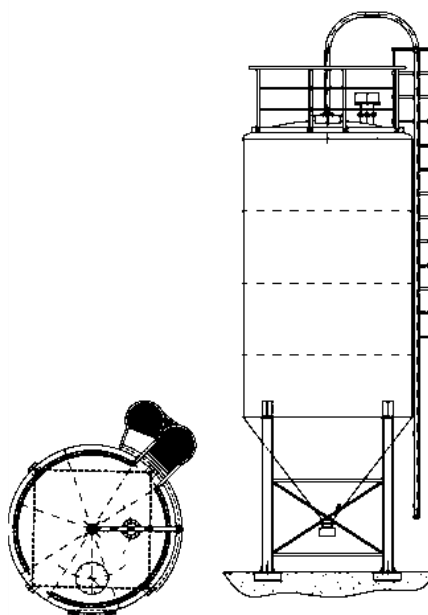


Figura 11-22 Silo IE-15

En la **Tabla 11-67**, se muestran las especificaciones del silo de almacenaje de carbón activo y catalizador.

Tabla 11-67 Dimensiones silo IE-15

| | |
|--|-------------|
| Volumen necesario [V_{alm}] (m^3) | 8,3 |
| Diámetro silo [D_{silo}] (m) | 2,5 |
| Altura silo [H_{silo}] (m) | 5 |
| Volumen silo [V_{silo}] (m^3) | 15,0 |

11.4 DISEÑO COLUMNAS DE DESTILACIÓN

En este apartado se detalla el diseño teórico y mecánico de las columnas de destilación presentes en la planta: DC-401 y DC-501.

11.4.1 Diseño teórico

Para diseñar la columna, es necesario realizar un diseño aproximado, llamado *Short-Cut*, que permita estimar las características principales de la columna. Una vez se obtengan los valores aproximados, éstos se utilizarán para realizar el método riguroso. Estos diseños se han realizado mediante el programa *Aspen HYSYS*.

11.4.1.1 Diseño aproximado (*Short-Cut*)

Para llevar a cabo el diseño de las columnas, en primer lugar, se ha realizado el cálculo previo basado en las volatilidades, ya que el simulador permite fijar qué compuestos tienen que salir por cabezas y por colas.

En primer lugar, se debe diseñar el *Short-Cut* con el simulador, mediante la opción "*short-cut distillation*". Aquí se introducen las condiciones de operación, el caudal de entrada y qué compuestos se obtendrán por cabezas y por colas. Al realizar la simulación, se determinan de forma aproximada las etapas teóricas de equilibrio la relación de reflujo externa (L/D) y las condiciones de operación necesarias para llevar a cabo la separación deseada.

11.4.1.2 Cálculo riguroso de la columna de destilación

Una vez determinados de forma aproximada el reflujo y las etapas teóricas de equilibrio se procede a realizar el diseño riguroso. En este caso se selecciona la columna "*Distillation Column Sub-Flowsheet*", la cual llevará a cabo la simulación basándose en las temperaturas en cada punto de la columna. En este apartado se introducen los valores obtenidos en el *Short-Cut* como valores iniciales para empezar la iteración. En la **Figura 11-23**, se observan los valores.

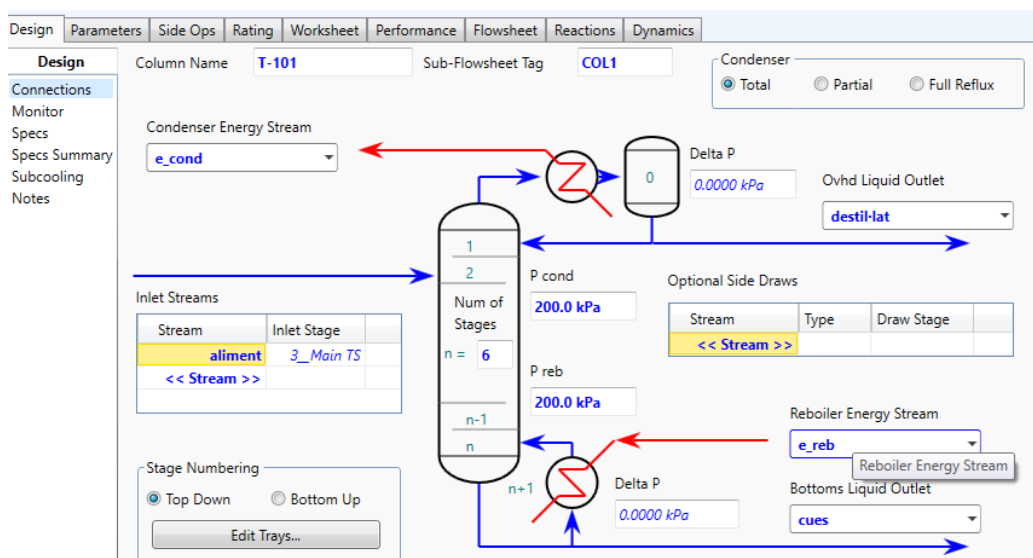


Figura 11-23 Diseño de la columna con los datos del Short-Cut

Con todos los valores introducidos, el programa lleva a cabo una iteración para calcular la composición de las corrientes de salida. Si estos no son los deseados, se modifica la relación de reflujo y/o el caudal de destilado hasta conseguir la separación deseada. En la **Figura 11-24**, se muestra la pantalla donde se observan la relación de reflujo y el caudal de destilado de una columna.

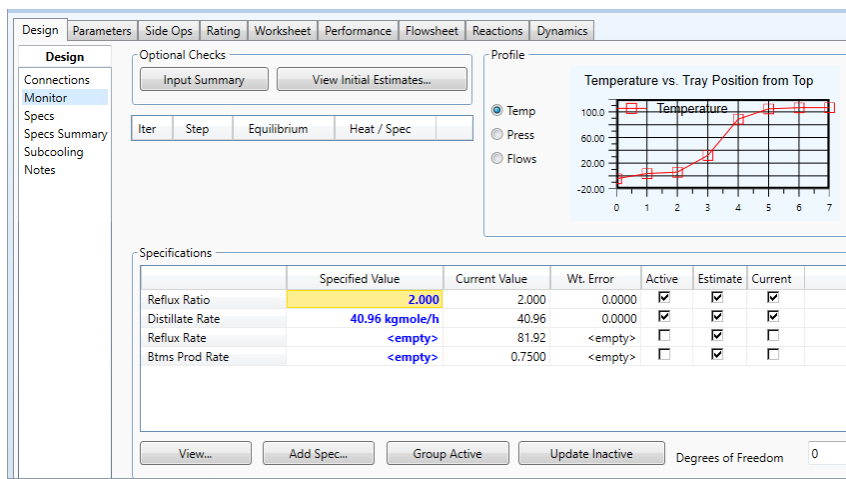


Figura 11-24 Pantalla valores relación de reflujo y caudal de destilado

En el apartado "Worksheet", se comprueba que las composiciones de salida por destilado y por colas son las deseadas, como se observa en la **Figura 11-25**. Si esto no es así, se vuelve al punto anterior y se modifican el caudal de destilado y/o la relación de reflujo hasta que se obtengan los valores de interés.

| Design | Parameters | Side Ops | Rating | Worksheet | Performance | Flowsheet | Reactions | Dynamics |
|------------------|--------------|----------|--------|-----------|-------------|------------|-----------|----------|
| Worksheet | | | | | | | | |
| Conditions | | | | | aliment | destil-lat | cues | |
| Properties | Acetylene | | | | 0.0150 | 0.0153 | 0.0000 | |
| Compositions | 12-CIC2 | | | | 0.0180 | 0.0000 | 0.9999 | |
| PF Specs | VinylCl | | | | 0.9600 | 0.9776 | 0.0001 | |
| | HCl | | | | 0.0070 | 0.0071 | 0.0000 | |
| | AcetAldehyde | | | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | |
| | 1-BromoC4 | | | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | |

Figura 11-25 Composiciones corrientes de la columna

11.4.2 Tipo de columna y diseño interno

11.4.2.1 Tipo de columna

Existen dos tipos de columnas de contacto, las que operan por etapas y en continuo. En el primer caso se utiliza trabajando con columnas de platos dónde se produce el contacto entre la fase líquida y la fase gas mediante una serie de platos que hay en el interior.

Por el contrario, para trabajar en continuo se utilizan columnas de relleno. Estos rellenos serán escogidos según las características de destilación, aleatorios o estructurados.

Ventajas columna de platos:

- Diámetros de trabajo superiores a 0,6 m.
- Presiones de trabajo superiores a la atmosférica.
- Fácil fabricación y menor coste económico.
- Mayor resistencia a los gradientes de temperatura.
- Fluido a destilar es considerado sucio o contiene contaminantes
- Fluido viscoso

Ventajas columna de relleno:

- Menor caída de presión y por lo tanto una mejor separación.
- Las columnas suelen ser de menor tamaño.
- Permiten trabajar en medios corrosivos.
- Menor tiempo de retención del líquido y por lo tanto una separación más rápida.
- Coste de mantenimiento menor.

Siguiendo estos criterios, se ha elegido utilizar columnas empacadas sin estructurar. El tipo de piezas de relleno y el material de estas, se muestra en la **Tabla 11-68**:

Tabla 11-68 Material y tipo de relleno en cada columna

| Columna | Material | Tipo de relleno |
|---------------|---------------------|----------------------|
| DC-401 | AISI 316 L + Halar® | Pall Plastic (12) |
| DC-501 | AISI 316 L + Halar® | Raschig Plastic (13) |

Se han elegido estos tipos de relleno porque ofrecen una mayor transferencia de materia y provocan una pérdida de carga razonable. Además, el relleno será desordenado para disminuir aún más la pérdida de carga y para tener columnas más económicas. Las columnas se han fabricado de AISI 316 L porque aguanta bien la corrosión que puedan provocar los fluidos que circulan por ellas. Aun así, ambas columnas se han recubierto del material HALAR® para aumentar la resistencia a la corrosión. Ya que estos equipos se podrían corroer si entrase humedad en ellos y se formase una pequeña cantidad de ácido clorhídrico que atacaría las paredes de AISI 316 L.

11.4.2.2 Diseño interno

Existen distintos elementos que forman parte de la columna empacada. En la **Figura 11-26**, se muestra un ejemplo de columna, el cual seguirán las dos columnas diseñadas en esta planta.

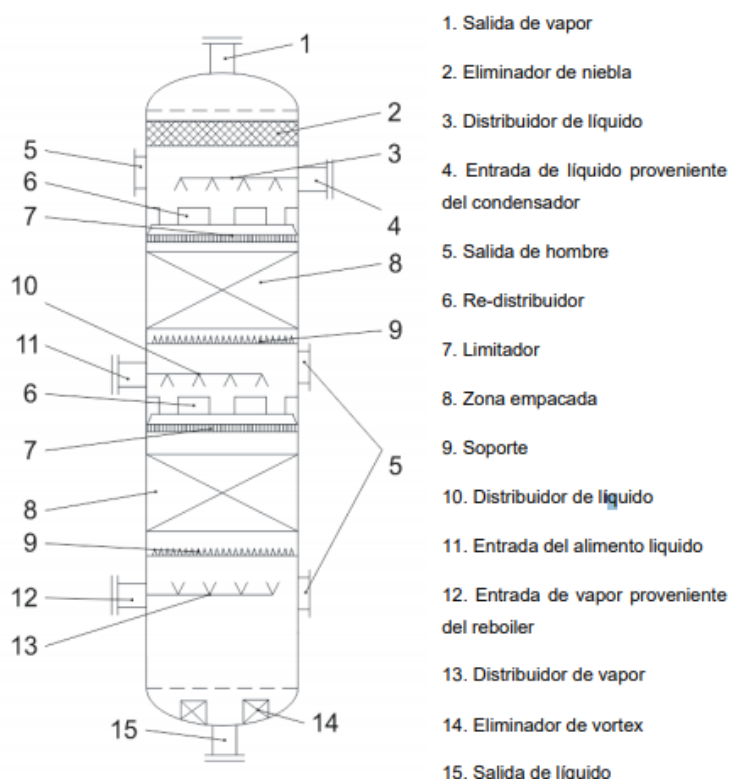


Figura 11-26 Disposición de los elementos internos de las columnas de destilación

Eliminador de niebla

Este elemento tiene la función de eliminar las gotas de líquido en suspensión que puede arrastrar la corriente de vapor antes que esta corriente salga por la parte superior de la columna. Este accesorio se instala únicamente en la cabeza de la columna.

El espesor de estos elementos suele estar entre los 5 y 30 cm y se instala 5 cm por debajo del inicio del cabezal tori esférico superior. En la **Figura 11- 27**, se muestra un ejemplo de eliminador de niebla de Koch-Glisch, el elegido para las columnas:

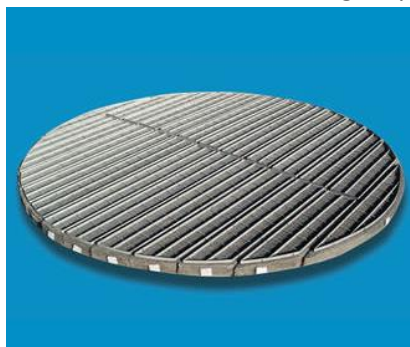


Figura 11- 27 Eliminador de niebla Koch-Glisch (SULZER)

Distribuidor de líquido

Las entradas de líquido en las columnas, en la DC-401 el reflujo de condensado, y en la DC-501 el alimento y el reflujo de condensado, se tienen que distribuir uniformemente a lo largo de la columna para garantizar una buena transferencia. Para ello es necesario el uso de un distribuidor líquido. Éste será de tubería agujereada como el que se observa en la **Figura 11-28**.



Figura 11-28 Distribuidor de líquido de Koch-Glisch (ENEXIO)

Redistribuidor

Elemento instalado debajo de todas las entradas de líquido con el objetivo de mezclar el líquido procedente de las corrientes de entrada para así distribuirlo de forma más uniforme a los rellenos.

Soporte y Limitador

El soporte es el accesorio que se encarga de sostener todo el peso ejercido por el relleno que se encuentra por encima de este. Encima del relleno se encuentra el limitador, que fijará la sección de relleno. Dichas piezas se escogerán de un catálogo, según las recomendaciones del fabricante del relleno, teniendo en cuenta que no pueden contribuir mucho en la pérdida de carga.

Sumidero y eliminador de vórtice

El sumidero es el elemento que actúa como depósito de líquido en la zona inferior de la columna, lo cual garantiza un caudal de líquido constante al reboiler. Además, en la parte inferior de la columna se instalan unos eliminadores de vórtices para evitar que entre gas a la bomba y la haga cavitarse, al salir el líquido hacia el reboiler.

Agujero humano

Este tipo de bocas tienen la finalidad de facilitar el mantenimiento de la columna habilitando zonas más accesibles a su interior. Éstas estarán situadas en las entradas de líquido y vapor, y por ellas debe poder entrar una persona con un equipo de limpieza, por lo que se recomienda que sean de un mínimo de 60x60 cm.

Empacado

El material de relleno de las dos columnas es el plástico, pero el tamaño y forma de ellos es diferente para ambas. Estos dos parámetros se calculan y seleccionan según el programa **Aspen HYSYS 10.0**. Esta opción permite elegir el tipo de relleno deseado y su diámetro, como se muestra en la **Figura 11- 29:Error! Reference source not found.**

Figura 11- 29 Ventana selección de empackado

Finalmente, como se muestra en la **Figura 11-30**, se fija el porcentaje máximo de inundación al que trabaja la columna. Para una buena eficacia las columnas deben trabajar entre un 50 y 80% de inundación. También se puede observar la correlación que utiliza el HYSYS para el cálculo de la pérdida de presión que sufre el fluido al circular por el relleno.

Figura 11-30 Ventana porcentaje de inundación y correlación pérdida de presión

Este procedimiento se ha llevado a cabo en las dos columnas del proceso. En la **Tabla 11-69**, se observan los resultados finales del diseño de éstas.

Tabla 11-69 Resultados diseño interno columnas

| Geometría columna | DC-401 | DC-501 |
|-----------------------------------|--------------|-----------------|
| Diámetro (m) | 0,7374 | 0,3 |
| Sección (m²) | 0,43 | 0,07 |
| Altura (m) | 4,29 | 8,52 |
| Tipo de empacado | Pall Plastic | Raschig Plastic |
| Diámetro relleno | 1 inch | 25 mm |
| Inundación max. (%) | 80 | 80 |
| Pérdida de presión (kPa/m) | 1,374 | 2,29 |

11.4.2.3 Diseño mecánico

Antes de empezar con los cálculos del espesor del cuerpo cilíndrico y los cabezales toriesféricos, se deben tener en cuenta una serie de factores que condicionarán estos espesores de las columnas.

Para a calcular el dimensionamiento del cabezal toriesférico, se utiliza una página web que calcula los fondos KLOPPER, igual que en el caso de los tanques, como marca la Figura 11-2 **Figura 11- 19** ,que apareció con anterioridad.

La altura necesaria de empacado de las columnas viene determinada por el diseño llevado a cabo por el programa Aspen HYSYS 10.0. Sin embargo, como se ha comentado con anterioridad, dentro de la columna existen una serie de accesorios que deben tenerse en cuenta a la hora de calcular la altura de la columna. En la **Tabla 11-70**, se muestran los valores definitivos de las alturas de las columnas.

Tabla 11-70 Altura total columnas

| | DC-401 | DC-501 |
|---------------------------------|--------|--------|
| Altura empacado (m) | 4 | 8,4 |
| Elementos internos (m) | 1,57 | 1,1 |
| Altura final columna (m) | 5,57 | 9,5 |

Dicho esto, ya se puede pasar a calcular el espesor del cuerpo cilíndrico y de los cabezales toriesféricos, para ello se utilizan las siguientes ecuaciones, las mismas que se utilizaron para el cálculo de los espesores de los tanques siguiendo el código ASME:

$$t_c = \frac{P_D \cdot R_C}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} + C.A. \quad (11-125)$$

$$t_F = \frac{P_D \cdot R \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_D} + C.A. \quad (11-126)$$

Los resultados se muestran en la **Tabla 11-71**:

Tabla 11-71 Resultado espesores columnas

| | DC-401 | DC-501 |
|-------------------------------|--------|--------|
| Altura columna (m) | 5,57 | 9,5 |
| Espesor cilindro (mm) | 3,8 | 4,7 |
| Espesor cabezales (mm) | 4,1 | 5,4 |

11.4.2.4 Cálculo del peso de la columna

Para el cálculo del peso de la columna vacía se tienen en cuenta el peso de los cabezales, el cilindro y el relleno. Para ello se siguen las siguientes ecuaciones:

$$P_E = P_{cil} + 2 \cdot P_{cab} + P_{relleno} + P_{aisl} \quad (11-127)$$

$$P_{cil} = \pi \cdot H_{cil} \cdot \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{material} \quad (11-128)$$

$$P_{cab} = \frac{1}{12} \cdot \rho_{material} \cdot (D_e^3 - D_i^3) \quad (11-129)$$

$$P_{relleno} = \rho_{relleno} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot L_{relleno} \cdot (1 - F_v) \quad (11-130)$$

$$P_{aisl} = \pi \cdot H_{cil} \cdot \left(\left(\frac{D_{eais}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{iais}}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{aislante} \quad (11-131)$$

Donde:

- $P_{relleno}$: Peso del relleno de la columna (kg)
- $\rho_{relleno}$: Densidad del relleno (kg/m³) (12); (13)
- $L_{relleno}$: Altura del relleno (m)
- F_v : Fracción de vacío característico del relleno

Los parámetros para el cálculo del peso del relleno de las columnas y su valor final se muestran en la **Tabla 11-72**:

Tabla 11-72 Resultados peso relleno de las columnas

| | DC-401 | DC-501 |
|--|--------|--------|
| Di (m) | 0,7374 | 0,3 |
| ρ_{relleno} (kg/m³) | 93 | 112 |
| L_{relleno} (m) | 4 | 8,4 |
| F_v (%) | 92 | 90 |
| Peso relleno (kg) | 12,7 | 6,65 |

Finalmente, en la **Tabla 11-73**, se muestran los valores del peso final de las columnas y los pesos utilizados para el cálculo del mismo:

Tabla 11-73 Resultados peso total de las columnas

| | DC-401 | DC-501 |
|---------------------------|--------|--------|
| Peso cilindro (kg) | 281,4 | 300 |
| Peso cabezal (kg) | 8,9 | 2 |
| Peso relleno (kg) | 12,7 | 6,65 |
| Peso aislante (kg) | 20,2 | 20,5 |
| Peso total (kg) | 332,1 | 331,2 |

11.5. DISEÑO DE TUBERÍAS

Para el diseño de tuberías se va a determinar el diámetro nominal y el espesor de aislante necesario.

11.5.1 Cálculo del diámetro nominal

Para calcular el diámetro de las tuberías es necesario conocer el caudal de cada tubería, así como la velocidad del fluido. Para suponer una velocidad inicial del fluido, se ha utilizado un valor perteneciente al intervalo de velocidades típicas de los fluidos de la **Tabla 11-74** a continuación.

Tabla 11-74 Tabla de las velocidades típicas de los fluidos en m/s.

| Velocidades típicas | | |
|---------------------|--------------------|-----------|
| Fluido | Flujo | Velocidad |
| Poco viscoso | Aspiración | 0,3-0,9 |
| | Impulsión | 1,2-3 |
| | Flujo por gravedad | 0,15-0,3 |
| | Línea conducción | 1,2-2,4 |
| Viscoso | Aspiración | 0,06-0,15 |
| | Impulsión | 0,15-0,6 |
| Vapor | - | 9-15 |
| Gas | - | 9-30 |

A continuación, se ha calculado el diámetro interno a partir del valor escogido de la velocidad y el caudal volumétrico de cada corriente. Para ello se ha utilizado la ecuación siguiente:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \rightarrow D_i = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{v \cdot \pi}} \quad (11-132)$$

Donde:

- **Q** es el caudal (m³/s)
- **v** es la velocidad (m/s)
- **Di** es el diámetro (m)

Una vez definido el diámetro mínimo necesario, se determinará el valor real del diámetro nominal de la tubería mediante la tabla de valores catalogados para cada material utilizado (**Figura 11- 31** *Error! Reference source not found.*).

| Nominal size | | OD mm | Welded & Seamless Carbon Steel Pipe to ASME B36.10M All dimensions are in mm | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|----------|---|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DN | NPS | | Schedule | | | | | | | | | | | | |
| | | | 10 | 20 | 30 | 40 | Std | 60 | 80 | XS | 100 | 120 | 140 | 160 | XXS |
| 6 | 1/8 | 10.3 | 1.24 | | 1.45 | 1.73 | 1.73 | | 2.41 | 2.41 | | | | | |
| 8 | 1/4 | 13.7 | 1.65 | | 1.85 | 2.24 | 2.24 | | 3.02 | 3.02 | | | | | |
| 10 | 3/8 | 17.1 | 1.65 | | 1.85 | 2.31 | 2.31 | | 3.20 | 3.20 | | | | | |
| 15 | 1/2 | 21.3 | 2.11 | | 2.41 | 2.77 | 2.77 | | 3.73 | 3.73 | | | | | |
| 20 | 3/4 | 26.7 | 2.11 | | 2.41 | 2.87 | 2.87 | | | 3.91 | | | | | |
| 25 | 1 | 33.4 | 2.77 | | 2.90 | 3.38 | 3.38 | | 4.55 | 4.55 | | | | | |
| 32 | 1 1/4 | 42.2 | 2.77 | | 2.97 | 3.56 | 3.56 | | 4.85 | 4.85 | | | | | |
| 40 | 1 1/2 | 48.3 | 2.77 | | 3.18 | 3.68 | 3.68 | | 5.08 | 5.08 | | | | | |
| 50 | 2 | 60.3 | 2.77 | | 3.18 | 3.91 | 3.91 | | 5.54 | 5.54 | | | | | |
| 65 | 2 1/2 | 73.0 | 3.05 | | 4.78 | 5.16 | 5.16 | | 7.01 | 7.01 | | | | | |
| 80 | 3 | 88.9 | 3.05 | | 4.78 | 5.49 | 5.49 | | 7.62 | 7.62 | | | | | |
| 90 | 3 1/2 | 101.6 | 3.05 | | 4.78 | 5.74 | 5.74 | | 8.08 | 8.08 | | | | | |
| 100 | 4 | 114.3 | 3.05 | | 4.78 | 6.02 | 6.02 | | 8.56 | 8.56 | | | | | |
| 125 | 5 | 141.3 | 3.40 | | | 6.55 | 6.55 | | 9.53 | 9.53 | | | | | |
| 150 | 6 | 168.3 | 3.40 | | | 7.11 | 7.11 | | 10.97 | 10.97 | | | | | |
| 200 | 8 | 219.1 | 3.76 | 6.35 | 7.04 | 8.13 | 8.13 | 10.31 | 12.70 | 12.70 | 15.09 | 10.25 | 20.62 | 25.01 | 22.23 |
| 250 | 10 | 273.0 | 4.19 | 6.35 | 7.80 | 9.27 | 9.27 | 12.70 | 15.09 | 12.70 | 18.26 | 21.44 | 25.40 | 28.58 | 25.40 |
| 300 | 12 | 323.8 | 4.57 | 6.35 | 8.38 | 10.31 | 9.53 | 14.27 | 17.48 | 12.70 | 21.44 | 25.40 | 28.58 | 33.32 | 25.40 |
| 350 | 14 | 386.6 | 6.35 | 7.92 | 9.53 | 11.13 | 9.53 | 15.09 | 19.05 | 12.70 | 23.83 | 27.79 | 31.75 | 36.71 | |
| 400 | 16 | 406.4 | 6.35 | 7.92 | 9.53 | 12.70 | 9.53 | 16.66 | 21.44 | 12.70 | 26.19 | 30.96 | 36.53 | 40.49 | |
| 450 | 18 | 457 | 6.35 | 7.92 | 11.13 | 14.27 | 9.53 | 19.05 | 23.83 | 12.70 | 29.36 | 34.93 | 39.67 | 45.24 | |
| 500 | 20 | 508 | 6.35 | 9.53 | 12.70 | 15.09 | 9.53 | 20.62 | 26.19 | 12.70 | 32.54 | 38.10 | 44.45 | 50.01 | |
| 550 | 22 | 559 | 6.35 | 9.53 | 12.70 | | 9.53 | 22.23 | 28.58 | 12.70 | 34.93 | 41.28 | 47.63 | 53.98 | |
| 600 | 24 | 610 | 6.35 | 9.53 | 14.27 | 17.48 | 9.53 | 24.61 | 30.96 | 12.70 | 38.89 | 46.02 | 52.37 | 59.54 | |
| 650 | 26 | 660 | 7.92 | 12.70 | | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 700 | 28 | 711 | 7.92 | 12.70 | 15.88 | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 750 | 30 | 762 | 7.92 | 12.70 | 15.88 | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 800 | 32 | 813 | 7.92 | 12.70 | 15.88 | 17.48 | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 850 | 34 | 864 | 7.92 | 12.70 | 15.88 | 17.48 | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 900 | 36 | 914 | 7.92 | 12.70 | 15.88 | 19.05 | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 950 | 38 | 965 | | | | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 1000 | 40 | 1016 | | | | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 1050 | 42 | 1067 | | | | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 1100 | 44 | 1118 | | | | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 1150 | 46 | 1168 | | | | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |
| 1200 | 48 | 1219 | | | | | 9.53 | | | 12.70 | | | | | |

Figura 11- 31 Tabla de las dimensiones de una tubería

Una vez obtenido el diámetro de las tuberías, se vuelve a calcular la velocidad para obtener el valor real de esta.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \quad (11-133)$$

11.10.2 Espesor del aislante

Según el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE), las tuberías por las que circulen fluidos con temperaturas de más de 40°C y menos de la temperatura ambiente (en este caso 15°C) deben estar aisladas.

El aislante escogido para las tuberías de alta temperatura es la lana de roca, mientras que para las tuberías de menor temperatura, se utilizará poliuretano. Esta elección se ha basado en las propiedades de cada material y su espesor se determinará mediante los valores predeterminados del RITE. En la **Tabla 11-75** se muestra el espesor mínimo que deben tener los aislantes respecto al diámetro externo y la temperatura del fluido. Estos valores se aplican para tuberías situadas al interior de un edificio. En caso de ser exteriores, se añadirá 10mm más de espesor a los fluidos calientes y 20mm a los fluidos fríos.

Tabla 11-75 Espesores mínimos (mm) según la temperatura máxima del fluido y el diámetro externo

| | Diámetro exterior (mm) | Temperatura máxima del fluido (°C) | | |
|--------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------|------------|
| | | 40...60 | >60...100 | >100...180 |
| Fluidos calientes | D ≤ 35 | 25 | 25 | 30 |
| | 35 ≤ D ≤ 60 | 30 | 30 | 40 |
| | 60 < D ≤ 90 | 30 | 30 | 40 |
| | 90 < D ≤ 140 | 30 | 40 | 50 |
| | 140 < D | 35 | 40 | 50 |
| | Diámetro exterior (mm) | Temperatura máxima del fluido (°C) | | |
| | | >-10...0 | >0...10 | <10 |
| Fluidos fríos | D ≤ 35 | 30 | 25 | 20 |
| | 35 ≤ D ≤ 60 | 40 | 30 | 20 |
| | 60 < D ≤ 90 | 40 | 30 | 20 |
| | 90 < D ≤ 140 | 50 | 40 | 30 |
| | 140 < D | 50 | 40 | 30 |

11.6. DISEÑO DE BOMBAS Y COMPRESORES

11.6.1 Diseño de las bombas

En el diseño de la bomba se calcula la potencia necesaria de esta para poder impulsar el fluido mediante el balance de energía mecánica.

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (v_2^2 - v_1^2) = w - e_v \quad (11-134)$$

Donde:

- **P1 y P2** son las presiones de entrada y salida de la bomba (kPa)
- **p** es la densidad del fluido (kg/m³)
- **z1 y z2** es el incremento de la altura (m)
- **a** es la constante del flujo (laminar=0.5 y turbulento=1)
- **v1 y v2** es la variación de la velocidad del fluido (m/s)
- **w** es el trabajo realizado por la bomba (J/kg)
- **e_v** es la pérdida de carga total proveniente de los accidentes o los tramos rectos

Es necesario realizar el cálculo de las pérdidas de carga mediante la determinación de las pérdidas por los tramos rectos (t.r) y los accidentes (ac).

$$e_v = e_{v_{t.r}} + e_{v_{ac}} \quad (11-135)$$

Para los tramos rectos se utiliza la ecuación siguiente que mediante el valor de la fricción determinado por Reynolds y la rugosidad relativa del material (4f), la velocidad (v), la longitud (L) y el diámetro (m) de las tuberías.

$$e_{v_{t.r}} = 4f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \quad (11-136)$$

Para Reynolds menores a 2100, el régimen es laminar. Consecuentemente, el factor f se considera de 16/Re. En cambio, para Reynolds mayores a 2100, se considera que es un régimen turbulento y por lo tanto es necesario determinar el factor f mediante el Ábaco de Moody (**Figura 11-32**) a partir del número del Reynolds y la rugosidad relativa del material. El número adimensional de Reynolds se calcula mediante la velocidad (m/s), el diámetro (m), la densidad del líquido (kg/m³) y la viscosidad del fluido (kg/m·s).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (11-137)$$

Mientras que la rugosidad relativa es la relación entre la porosidad del material y el diámetro de la tubería.

$$\text{rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (11-138)$$

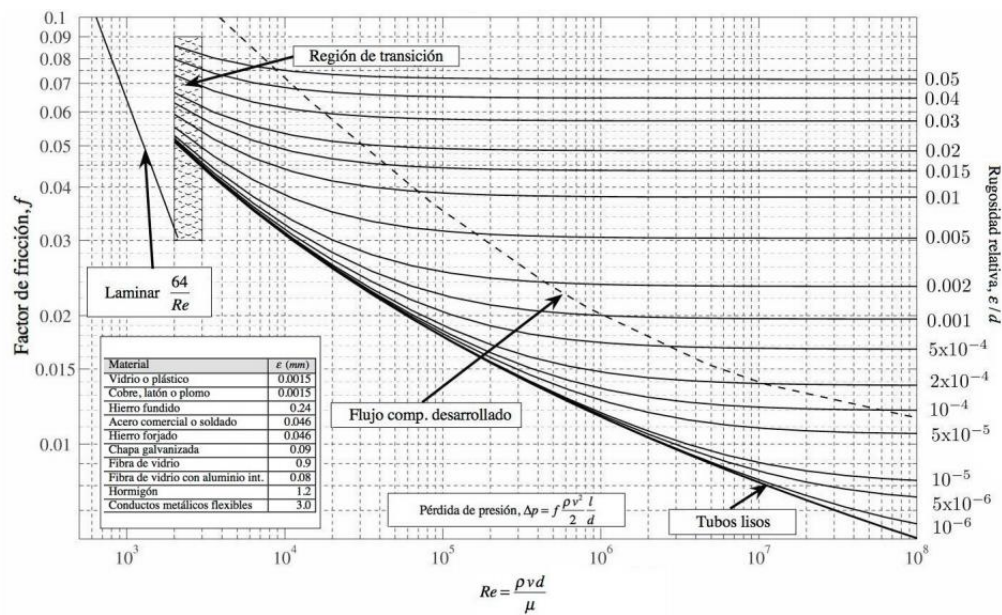


Figura 11-32 Ábaco de Moody

Una vez obtenido el valor de las pérdidas por tramos rectos, se calcula las pérdidas por accidentes mediante la ecuación 11.6-6

$$e_{vac} = \sum K \cdot \frac{v^2}{2} \quad (11-139)$$

En el cual, K es un coeficiente que depende de cada accidente y la v es la velocidad del fluido (m/s).

| ACCIDENT | K |
|-----------------------------------|---------|
| Entrada encanonada | 0,78 |
| Entrada cantells vius | 0,50 |
| Entrada arrodonida | 0,04 |
| Sortida encanonada | 1,00 |
| Sortida cantells vius | 1,00 |
| Sortida arrodonida | 1,00 |
| Colzes/ Unions | |
| Colze de 45° standard | 0,35 |
| Colze de 45° gran curvatura | 0,20 |
| Colze de 90° standard | 0,75 |
| Colze de 90° gran curvatura | 0,45 |
| Colze de 90° petita curvatura | 1,3 |
| Corba de 180° | 1,5 |
| T standard ús com a colze | 1,0 |
| T standard amb bifurcació tancada | 0,4 |
| T standard amb divisió de cabal | 1,0 (a) |
| Unió roscada | 0,04 |
| Maneguet d'unió | 0,04 |
| Vàlvula comporta | |
| oberta | 0,17 |
| ¾ oberta | 0,90 |
| ½ oberta | 4,5 |
| ¼ oberta | 24,0 |
| Vàlvula de diafragma | |
| oberta | 2,3 |
| ¾ oberta | 2,6 |

| | |
|-------------------------------------|--------|
| ½ oberta | 4,3 |
| ¼ oberta | 21,0 |
| Vàlvula de seient | |
| oberta | 9,0 |
| ¾ oberta | 13,0 |
| ½ oberta | 36,0 |
| ¼ oberta | 112,0 |
| Vàlvula angular oberta | 2,0 |
| Vàlvula de retenció (oberta) | |
| de chamera (frontissa) | 2,0 |
| de bola | 70,0 |
| de disc | 10,0 |
| Cabalímetres mecànics | |
| de disc | 7,0 |
| de pistó | 15,0 |
| rotatori | 10,0 |
| de turbina | 6,0 |
| Canvi de diàmetre | |
| estretament | ** (b) |
| eixamplament | ** (b) |

Figura 11-33 Tabla valores coeficiente K para diversos accidentes

Mediante los valores de las pérdidas de cargas calculados, la variación de la presión, la densidad y la variación de la velocidad, ya es posible calcular el valor del trabajo de la bomba aislando w de la ecuación del balance de energía mecánica.

$$w = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + e_v \quad (11-140)$$

Para obtener la potencia (Pot.) de la bomba, es necesario multiplicar el trabajo (w) por el caudal (Q) y la densidad del fluido (ρ). Pero como la energía que suministra la bomba no es totalmente absorbida por el fluido y hay perdidas, se considera una eficacia de un 75% (rendimiento) y la potencia real se dividirá con el rendimiento.

$$Pot. = w \cdot Q \cdot \rho \quad (11-141)$$

$$P_{real} = \frac{Pot.}{0.75} \quad (11-142)$$

Las cargas de impulsión y aspiración se han calculado mediante el valor de las pérdidas de carga en el tramo anterior y posterior del equipo.

$$h_{asp} = \Delta z_{asp} + \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{P_1}{\rho} \cdot \frac{v_1}{2} - e_{v_{asp}} \right) \quad (11-143)$$

$$h_{imp} = \Delta z_{imp} + \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{P_2}{\rho} \cdot \frac{v_2}{2} - e_{v_{imp}} \right) \quad (11-144)$$

$$h_{total} = h_{imp} - h_{asp} \quad (11-145)$$

Para evitar posibles cavitaciones se ha comprobado que el NPSH disponible del fluido sea mayor al requerido. Para ello se ha calculado el NPSH disponible mediante la ecuación 11.6-13.

$$NPSH_{disp} = \Delta z + \frac{1}{g} \cdot \left[\left(\frac{P_1 - P_v}{\rho} \right) + \frac{v_1}{2 \cdot a} - e_v \right] \quad (11-146)$$

Mientras que en el caso del NPSH requerido, se ha calculado mediante la ecuación 11.6-14

$$NPSH_{req} = 0,1 \cdot \left(\frac{P_v}{\rho \cdot g} \right) \quad (11-147)$$

Donde:

- Δz es la variación en la altura (m)
- P_1 es la presión en la entrada de la bomba (kPa)
- P_v es la presión de vapor del fluido (kPa)
- V_1 es la velocidad del fluido en la entrada de la bomba (m/s)
- a es el coeficiente del régimen del flujo
- e_v son las pérdidas de carga

11.6.2 Diseño de los compresores

Para determinar la potencia de los compresores se ha tenido en cuenta los caudales y fluidos a impulsar, así como las condiciones de presión, temperatura y compresibilidad de la corriente. Se calcula la potencia del compresor a partir de calcular antes la relación de presiones de entrada y salida y el número de etapas. Se calcula la relación de presiones (α) mediante la ecuación siguiente:

$$\alpha = \frac{P_{\text{impulsión}}}{P_{\text{aspiración}}} \quad (11-148)$$

Y el número de etapas a partir del valor de α y r . Para el valor de la relación de compresión (r) para los compresores centrífugos oscila entre 2,5 y 5. Para el cálculo se ha utilizado un valor intermedio de 3,75.

$$r = \sqrt[N]{\alpha} \rightarrow N = \frac{\ln(\alpha)}{\ln(r)} \quad (11-149)$$

Una vez obtenido el valor del número de etapas, se calcula la potencia del compresor mediante la siguiente ecuación:

$$w = N \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{Z \cdot R \cdot T_e}{PM} \cdot \left(\frac{P_i}{P_a}^{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)} - 1 \right) \quad (11-150)$$

Donde:

- W es la potencia del compresor en J/kg
- N es el número de etapas
- γ es la relación C_p/C_v
- Z es el factor de compresibilidad
- R es la constante de los gases (8,31 J/mol·K)
- T_e es la temperatura de entrada al compresor
- PM es el peso molecular del fluido
- P_i es la presión de impulsión
- P_a es la presión de aspiración

Para obtener la potencia del compresor en W se multiplica por el caudal másico como se muestra a continuación. Teniendo en cuenta el rendimiento del compresor (η), la potencia real se calcula como se muestra en la ecuación 11.6-19

$$Pot (W) = w \left(\frac{J}{kg} \right) \cdot m \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (11-151)$$

$$P_{real} (W) = \frac{Pot}{\eta} \quad (11-152)$$

11.7 BIBLIOGRAFÍA

1. **Trambouze, Pierre y Euzen, Jean-Paul.** Chapter 6. General characteristics of heterogeneous catalytic reactors. *Chemical reactors. From design to operation*. París : Editions TECHNIP, 2004.
2. **Levenspiel, Octave.** Capítulo 19. El reactor catalítico empacado. *Ingeniería de las reacciones químicas*. México : LIMUSA WILEY, 2004.
3. —. Capítulo 18. Reacciones catalizadas por sólidos. *Ingeniería de las reacciones químicas*. México : LIMUSA WILEY, 2004.
4. **Shankar, H. Subbaraman y Agnew, John B.** *Kinetics of acetylene hydrochlorination*. Victoria, Australia. : Department of chemical engineering. Monash University., 1980.
5. **Trambouze, Pierre y Euzen, Jean-Paul.** Chapter 7. Reactors employing a fluid phase and a catalytic solid phase: Fixed bed, moving bed, fluidized bed. *Chemical reactors. From design to operation*. Paris : Editions TECHNIP, 2004.
6. **Walas, Stanley M.** Section 23. Chemical reactors. *Perry's chemical engineers' handbook*. 7th edition. USA : McGraw-Hill, 1997.
7. **Coulson, J.M. y Richardson, J.F.** Part 2. Heat transfer. [ed.] 6th edition. *Chemical engineering. Volume 1*. 6th edition. Oxford : Butterworth Heinemann, 1999.
8. **Fondos Klopper. Horfasa.** [En línea] 03 de Febrero de 2010. [Citado el: 28 de Abril de 2018.] <http://horfasa.com/utilidades.php?ide=41&card=3>.
9. **Chemical Compatibility Database. Cole-Parmer.** [En línea] [Citado el: 01 de Mayo de 2018.] <https://www.coleparmer.com/Chemical-Resistance>.
10. **Megyesy, Eugene F.** *Manual de recipientes a presión*. Guanajuato, México : LIMUSA, 1989. ISBN 968-18-1985-3.
11. **SILOS METÁLICOS. LAPESA.** [En línea] 16 de Febrero de 2015. [Citado el: 02 de Junio de 2018.] <http://www.lapesa.com/sites/default/files/documentos/silos-e-01.pdf>.
12. **Anillos Pall. Relleno para torres.** [En línea] [Citado el: 18 de 05 de 2018.] <http://www.besora.com.ar/anillos.html>.
13. **Peng, Suzi.** Anillo raschig de plástico. *Jiangxi Kelley Chemical Packing Co., Ltd.* [En línea] [Citado el: 15 de Mayo de 2018.] <http://www.kelley-chempacking.es/3-4-plastic-rachig-ring.html>.
14. **Real Decreto 379/2001. ITC MIE-APQ 1.** 6 / Abril / 2001, p. 82.