
Planta de producción de Acrilonitrilo



Víctor Fernández Gusó
Berta Sayos Terradellas
Marc Terradas i Montaña
Sara Vázquez Pérez
Francisca Vallespir Torrens

2012

UAB

Universitat Autònoma de Barcelona



11. MANUAL DE CÁLCULO

ÍNDICE

11. MANUAL DE CÁLCULO	5
11.1.- TANQUES ALMACENAMIENTO	5
11.1.1.- Almacenamiento del producto: Acrilonitrilo	8
11.1.2.- Almacenamiento de materias primas: Propileno	19
11.1.3.- Almacenamiento de materias primas: Amoníaco anhidro.....	27
11.1.4.- Almacenamiento del subproducto: Ácido cianhídrico.....	34
11.1.5.- Almacenamiento del reactivo: Ácido sulfúrico	40
11.1.6.- Almacenamiento del subproducto sólido: Sulfato amónico.....	50
11.1.7.- Almacenamiento del subproducto: Acetonitrilo.....	57
11.1.8.- Almacenamiento de residuo líquido (purificación HCN).....	68
11.1.9.- Almacenamiento de residuos: Polímero acrilonitrilo	76
11.1.10.- Almacenamiento de inhibidor: Hidroquinona monometil éter.....	85
11.2.- COLUMNAS.....	91
11.2.1.- Columna de absorción (CA-302).....	92
11.2.2.- Columna de rectificación extractiva (CD-301)	114
11.2.3.- Columnas de rectificación	126
11.2.3.1.- Columna de rectificación (CD-302)	126
11.2.3.2.- Columna de rectificación (CD-601)	138
11.2.3.3.- Columna de rectificación (CD-602)	152
11.2.3.4.- Columna de rectificación (CD-501)	164
11.2.3.5.- Columna de rectificación (CD-502)	177
11.2.3.6.- Columna de rectificación (CD-701)	189
11.2.4.- Quench (CA-301)	202

11.2.5.- Columna flash (CF-301)	226
11.3.-SEPARADOR DE FASES DE LA COLUMNA (CD-601).....	232
11.3.1.- Diseño mecánico	234
11.4.-TANQUES DE PROCESO	241
11.4.1.- Tanques de separación de fases de las columnas:.....	241
11.4.2.- Tanques pulmón para aguas residuales:.....	248
11.5.- REACTOR (R-201, R-202)	250
11.5.1.- Esquema de reacción	250
11.5.2.- Catalizador.....	253
11.5.3.- Modelización del reactor	255
11.5.4.- Ciclones para la recuperación del catalizador.....	261
11.5.5.- Sistema de intercambio de calor.....	266
11.5.6.- Diseño mecánico del reactor.....	271
11.6.- INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	286
11.6.1.- Intercambiadores de carcasa y tubos	286
11.6.2.- Kettle-reboilers.....	308
11.6.3.- Intercambiadores de doble tubo	317
11.6.4 - Fired Heater.....	322
11.7.- SISTEMA DE IMPULSIÓN DE SÓLIDOS NEUMÁTICO.....	325
11.8.- CÁLCULO DE TUBERÍAS.....	326
11.8.1.- Selección del diámetro interno de la conducción.....	326
11.9.- EQUIPOS DE IMPULSIÓN DE FLUIDOS.....	329
11.9.1.- Bombas.....	329
11.9.2.- Soplantes	331
11.9.3.- Compresores.	331

11. Manual de cálculo

11.10.- GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD (TURBINA G-1001).....	332
11.11.- TORRES DE REFRIGERACIÓN	334
11.12.- CHILLER.....	338
11.12.1.- Agua de refrigeración.....	338
11.12.2.- Agua glicolada	340
11.13.- CALDERA VAPOR	341
11.13.1.- Operación.....	341
11.1.2.- Puesta en marcha.....	343
11.14.- DISCOS DE RUPTURA.....	344

11. MANUAL DE CÁLCULO

11.1.- TANQUES ALMACENAMIENTO

En primer lugar se introducen brevemente conceptos teóricos previos.

- Stock

Hay que tener en cuenta que el suministro de materias primas y la recogida de los productos terminados, pueden sufrir un contratiempo. Esto causaría problemas en el funcionamiento de la planta y para prevenir esto se estima un tiempo de residencia de cada sustancia teniendo en cuenta la cantidad necesaria o producida y la forma de transportarla.

- Factor de seguridad

Para prevenir tensiones derivadas a variaciones de caudal o a movimientos del fluido a consecuencia de las operaciones de carga y descarga, es importante sobredimensionar los tanques de almacenamiento. Este factor de seguridad supone una desocupación del tanque igual al 15-20%.

- Relación altura-diámetro

Según la bibliografía, hace falta respetar una relación altura-diámetro de $H/D = 1,5-2$ para el diseño de tanques cilíndricos. La altura referida es la altura del cilindro del tanque y no la altura del tanque, ya que ésta resulta de la suma de la altura del cilindro y los cabezales. En cuanto el diámetro, es importante tener en cuenta que los equipos que superen un diámetro de 4m requieren un transporte especial para su traslado. Por otro lado no sale rentable tener muchos tanques ya que cuanto más tanques más sistemas de control. Al valorar los dos inconvenientes hay que destacar que el control resulta más costoso que construir el tanque de grandes dimensiones in situ, en la planta.

- Material diseño tanques

Para la selección del material de construcción se debe contemplar:

- Tipos de sustancia a almacenar. El material seleccionado debe tener una buena resistencia a la corrosión ante la sustancia almacenada.
- Resistencia mecánica del material a las condiciones de operación de temperatura y presión.
- Precio del material.

Para conocer la interacción de cada sustancia a almacenar, con los distintos materiales disponibles a la industria se ha empleado la guía de *Harrington Industrial Plastics*.

- Factor de corrosión

A parte de escoger un buen material de diseño para combatir la corrosión, se debe aplicar un factor de corrosión como prevención, ya que en menor efecto que otro material este también sufrirá un desgaste a lo largo del tiempo. Este factor de seguridad, se determina en función del material y de su valor máximo de corrosión estimado durante 10 años como indica la normativa ASME.

Para los aceros inoxidable, que es el material que se ha escogido para el diseño de los tanques requeridos en la planta de acrilonitrilo, el factor de corrosión óptimo es:

$$C_1 = 1,5 \text{ mm}$$

- Factor de soldadura

La zona de soldaduras es una de las zonas más debilitadas del tanque, ya que la chapa presenta discontinuidades que pueden llegar a intensificar las tensiones a las que está sometido el material. Para disminuir la tensión máxima admisible, se aplica un factor de seguridad. Según la normativa ASME:

Tabla 11.1.1.- Factor de seguridad de la normativa ASME.

Tipo soldadura	Radiografiado Total	Radiografiado Parcial
Simple	1,00	0,85
Doble	0,90	0,80

Para los tanques que no son a presión se ha escogido un factor de soldadura de $E=0,85$. En cambio para los de presión se ha escogido un factor de $E=1,00$.

- Venteo

Según la normativa ITC-MIE-APQ, todos los tanques requieren un sistema de venteo para prevenir de posibles deformaciones del recipiente debidas a variaciones de la presión en operaciones de carga y descarga y/o variaciones de la temperatura ambiente. En los tanques a presión, la normativa exige un sistema de venteo de emergencia para prevenir un exceso de presión interna en caso de que haya fuego exterior.

El venteo depende de dos factores:

- Caudal de entrada/salida del fluido al tanque.
- Respiración artificial del tanque debido a variaciones de la temperatura.

Hay que recordar que se ha sobredimensionado el sistema de tratamiento de gases de la A-800 para tratar una posible fuga o el venteo de las sustancias almacenadas en el parque de tanques. En el caso del tanque de ácido cianhídrico se dispone de un equipo scrubber para tratarlo y así evitar la emisión de este a la atmosfera.

- Aislamiento

El aislamiento es muy importante per tal de minimizar las perdidas de calor, pero también como a medida de seguridad para un posible contacto con el tanque.

Para escoger el tipo de aislante se ha consultado la empresa ISOVER.

- Normativa

El diseño de los tanques, se realiza de acuerdo con la normativa de equipos a presión recogida en el código ASME (American Society of Mechanical Engineers, Code for Pressure Vessels) y con las instrucciones técnicas complementarias de almacenaje de productos químicos (ITC MIE APQ) correspondiente a este tipo de compuesto.

11.1.1.- Almacenamiento del producto: Acrilonitrilo

11.1.1.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

En este apartado, se recoge el diseño de los tanques de almacenamiento de acrilonitrilo (99,7% de pureza en masa) en estado líquido y a temperatura ambiente.

Para dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de cuatro días (tiempo de stock). Hay que tener en cuenta que el transporte de acrilonitrilo, se efectúa por carretera, mediante camiones y por lo tanto se considera un tiempo de residencia suficiente, por si el acrilonitrilo no pudiera ser recogido debido a problemas ajenos a la propia planta. Por otra parte, el aumento del tiempo de residencia supondría incrementar el volumen de los tanques de almacenaje, y por lo tanto un problema de espacio en la planta.

El volumen de acrilonitrilo que se produce diariamente, es de 186,124 m³/día. Como ya se ha comentado anteriormente, el tiempo de residencia fijado es de 4 días. Por tanto, el volumen de producto a almacenar durante este tiempo es de 744,496 m³. El producto será recogido en camiones cisterna, con una capacidad de 30 m³. Se prevé un stock de 4 días, para tener en cuenta vagas en el transporte y otros contratiempos.

A continuación, se muestra el cálculo del número de camiones necesarios para retirar el acrilonitrilo de la planta.

- Número de camiones diarios:

Para conocer el número de camiones diarios que necesita la planta, se debe conocer el volumen diario de producto producido (almacenamiento de producto) y el volumen del camión cisterna.

$$N^{\circ} \text{ camiones diarios} = \frac{V_{\text{diario}}}{V_{\text{camión}}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 1})$$

$$N^{\circ} \text{ camiones diarios} = \frac{186,124}{30} = 6,204 \approx 7 \text{ camiones/día}$$

Se debe tener en cuenta que en un día laboral los camiones pueden ir a la planta durante 12h (horario de 8h a 20h).

También se debe conocer el volumen de stock que se tendrá:

$$V_{\text{stock}} = \text{días de previsión} \cdot V_{\text{diario}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 2})$$

$$V_{\text{stock}} = 4 \cdot 186,124 = 744,496 \text{ m}^3$$

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento, se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, por los motivos que ya se han explicado al principio.

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 744,496 \cdot (1 + 0,15) = 856,170 \text{ m}^3$$

Ahora se calcula el número de tanques necesarios para almacenar el producto durante 4 días.

- Número de tanques de almacenamiento:

Se escoge un volumen de tanque de 180 m^3 y con el volumen de líquido ya sobredimensionado, se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}}}{V_{\text{tanque}}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 3})$$

$$NT = \frac{856,170}{180} = 4,757 \cong 5 \text{ tanques}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{stock}}}{NT}}{V_{\text{tanque}}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 4})$$

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{744,496}{5}}{180} = 82,722 \cong 83$$

11.1.1.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando un volumen de tanque de 180 m³, teniendo en cuenta la relación de altura-diámetro y sabiendo que la proporción de la altura del cabezal semiesférico con el diámetro del tanque es de la mitad, se dimensiona el tanque real cilíndrico.

$$\text{Se conoce que } \begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} \\ h_{\text{cabezal}} = D_{\text{tanque}}/2 \end{cases}$$

El volumen real del tanque es la suma del volumen del cilindro más el volumen de los dos cabezales. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

Sustituyendo esta relación a la ecuación de volumen total del tanque y aislando el diámetro se determina este parámetro:

$$\begin{aligned} V_{\text{tanque}} &= V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} \\ &= \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int,tanque}}^2 \cdot h_{\text{cilindro}} \right] + \left[\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{int,tanque}}}{2} \right)^3 \right] \quad (\text{Ec. 11.1.5}) \\ V_{\text{tanque}} = 180 &\xrightarrow{\text{aislando } D} D_{\text{int,tanque}} = 4,614 \text{ m} \end{aligned}$$

Hace falta remarcar que estos tanques de acrilonitrilo se deberán construir in situ ya que superan los 4m de diámetro.

Se calcula el volumen del cabezal del cilindro. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

$$\begin{aligned} V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} &= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{int,tanque}}}{2} \right)^3 \quad (\text{Ec. 11.1.6}) \\ V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} &= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{4,614}{2} \right)^3 = 25,714 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

El volumen del cilindro será:

$$V_{\text{cilindro}} = V_{\text{tanque}} - V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} \quad (\text{Ec. 11.1.7})$$

$$V_{\text{cilindro}} = 180 - 25,714 = 154,286 \text{ m}^3$$

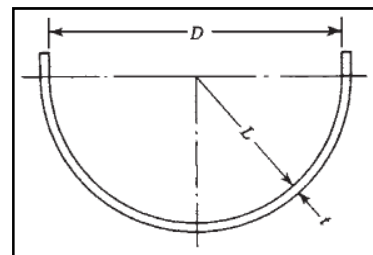
A continuación, se calcula la altura total del tanque:

$$h_{\text{tanque}} = h_{\text{cilindro}} + h_{\text{cabezal}} \quad (\text{Ec. 11.1.8})$$

$$h_{\text{tanque}} = h_{\text{cilindro}} + h_{\text{cabezal}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} + \frac{D_{\text{tanque}}}{2} = 9,228 + 2,307 = 11,535 \text{ m}$$

11.1.1.3.- Diseño mecánico tanque

El diseño de los tanques de acrilonitrilo siguen la normativa ASME y la norma ITC MIE-APQ.001 (almacenamiento de sustancias inflamables y combustibles). Dentro de la normativa ITC MIE-APQ.001 el acrilonitrilo está clasificado como un producto de subclase B1. Esta sustancia también debe contemplar la norma ITC MIE-APQ.007 ya que es una sustancia toxica.



Para el diseño mecánico hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C:

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \quad (\text{Ec. 11.1.9})$$

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^{\circ}\text{C}$$

Como se quiere almacenar a temperatura ambiente, se ha escogido una temperatura de operación de 20°C.

- Material de los tanques

Para la construcción de los tanques de acrilonitrilo, se ha escogido el hacer inoxidable AISI304, que según la empresa *Harrington Industrial Plastics*, este tiene una compatibilidad con el acrilonitrilo catalogada de *excellent*.

- Calculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se

busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1 \text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

- Parte cilíndrica

Primero se calcula la altura de líquido para poder calcular después, la variación de presión.

$$h_{\text{líquido}} = \frac{V_{\text{líquido}}^{\text{tanque}}}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \quad (\text{Ec. 11.1.10})$$

$$h_{\text{líquido}} = \frac{186,124}{\frac{\pi}{4} \cdot 4,614^2} = 11,132 \text{ m}$$

Conociendo la densidad del acrilonitrilo, que se encuentra bibliográficamente, y es de 810 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = \rho_{\text{líquido}} \cdot g \cdot h_{\text{líquido}} \quad (\text{Ec. 11.1.11})$$

$$\Delta P = 810 \cdot 9,81 \cdot 11,132 = 88456,408 \text{ Pa}$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = \Delta P + P_{\text{operación}} \quad (\text{Ec. 11.1.12})$$

$$P_{\text{diseño}} = \Delta P + P_{\text{operación}} = 88456,408 + 101325 = 189781,408 \text{ Pa}$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%

$$P_{\text{diseño}} = 189781,408 * (1 + 0,15) = 2,18 \cdot 10^5 \text{Pa}$$

Finalmente se calcula el espesor del cilindro, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)
- E: factor de soldadura (0,85)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot R}{E \cdot S - 0,6 * P_{\text{diseño}}} + C_1 \quad (\text{Ec. 11. 1. 13})$$

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{2,18 \cdot 10^5 \cdot 2,307}{0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,6 * 2,18 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 4,46 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$= 4,464 \text{ mm}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor de cilindro calculado y se suma a este para encontrar el espesor de cilindro final:

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = \overbrace{t_{\text{cilindro}} * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cilindro}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 14})$$

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = 4,464 + 0,446 = 4,910 \text{mm} \rightarrow 5 \text{ mm}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 5mm.

- Parte del cabezal superior semiesférico

En este caso, se calcula el espesor del cabezal con la misma expresión anterior pero aquí la presión de diseño es la presión atmosférica sobredimensionada 15%

$$t_{\text{cabezal}} = \frac{p_{\text{diseño}}^{\text{cabezal}} \cdot R}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 * p_{\text{diseño}}^{\text{cabezal}}} + C_1 \quad (\text{Ec. 11. 1. 15})$$

$$t_{\text{cabezal}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 2,307}{2 \cdot 0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 * 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 3,08 \cdot 10^{-3} \text{m} = 3,082 \text{ mm}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del cabezal calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{cabezal}}^{\text{final}} = \overbrace{t_{\text{cabezal}} * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cabezal}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 16})$$

$$t_{\text{cabezal}}^{\text{final}} = \overbrace{3,082 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cabezal}} = 3,082 + 0,308 = 3,390 \text{ mm} \rightarrow 4 \text{mm}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 4mm.

- Fondo inferior

Bibliográficamente, se encuentra que el espesor debe de tener el acero es de 6,5 mm más la tolerancia a la corrosión. Así que el espesor será de 8 mm (t_{fondo}).

11.1.1.4.- Cálculo del venteo total para líquidos

El recipiente de almacenamiento debe de disponer de sistemas de venteo para prevenir su deformación. El sistema de venteo debe de tener un diámetro mínimo de 35 mm y siempre igual o superior al tamaño de la tubería que llena o vacía el tanque. Este recipiente de almacenamiento también debe disponer de un dispositivo que permite aligerar un exceso de presión interna.

Primero se calcula la superficie húmeda del tanque:

$$A_{\text{húmeda}} = \pi \cdot D \cdot h_{\text{tanque}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 17})$$

$$A_{\text{húmeda}} = \pi \cdot 4,614 \cdot 11,132 = 161,359 \text{ m}^2$$

Seguidamente se calcula el calor recibido en caso de fuego externo:

$$Q_{\text{fuego}} = 139,7 \cdot F \cdot A_{\text{húmeda}}^{0,82} \cdot 10^3 \quad (\text{Ec. 11. 1. 18})$$

$$Q_{\text{fuego}} = 139,7 \cdot 1 \cdot 161,359^{0,82} \cdot 10^3 = 9,028 \cdot 10^6 \text{ KJ/h}$$

El factor F, que es el factor de reducción sin dimensiones, es igual a la unidad.

Finalmente se calcula la capacidad de venteo:

$$C_{\text{venteo}} = \frac{4,414 \cdot Q_{\text{fuego}}}{\lambda_{\text{vap}} \cdot \sqrt{PM_{\text{compuesto}}}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 19})$$

$$C_{\text{venteo}} = \frac{4,414 \cdot 9,028 \cdot 10^6}{615,4 \cdot \sqrt{53,1}} = 8886,175 \text{ m}^3/\text{h}$$

El valor del calor latente de vaporización se busca en la bibliografía.

11.1.1.5.- Aislamiento

El tanque de almacenamiento de acrilonitrilo debe de estar aislado térmicamente mediante lana de roca con un espesor de 50 mm. Este aislante aparte de ser un buen aislante, es incombustible. Se decide escoger la empresa *Isover* para que proporcione este aislante. El aislante escogido es el llamado *Spintex HP-353*.

11.1.1.6.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios.

Según la normativa MIE-APQ-001 y MIE-APQ-007, todo recipiente que contenga sustancias inflamables y corrosivas, tiene la obligación de tener unos cubetos de retención de líquidos por si hay algún tipo de fuga. Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa y el espesor del aislante escogido:

$$D_{\text{total}} = D + (2 \cdot t_{\text{cilindro}}) + (2 \cdot t_{\text{aislante}}) \quad (\text{Ec. 11. 1. 20})$$

$$D_{\text{total}} = 4,614 + (2 \cdot 0,005) + (2 \cdot 0,05) = 4,724 \text{ m}$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 1,5 metro entre tanques. Como la generatriz en este caso supera el 1,75 ya que es de 2, la distancia entre tanques según la normativa será (D la semisuma de generatriz y diámetro):

$$S_{\text{tanques}} = 0,5 \cdot D_{\text{total}} = 0,5 \cdot \frac{D_{\text{total}} + \overset{\text{generatriz (H/D)}}{\sqrt{2}}}{2} \quad (\text{Ec. 11. 1. 21})$$

$$S_{\text{tanques}} = 0,5 \cdot \frac{4,724 + 2}{2} = 1,7 \text{ m}$$

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{NT}{2}\right) \cdot D_{\text{total}} + S_{\text{tanque}} \cdot \left(\frac{NT}{2} - 1\right) + 2 \cdot S_{\text{cubeto}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 22})$$

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{5}{2}\right) \cdot 4,724 + 1,7 \cdot \left(\frac{5}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 19,331 \text{ m}$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot D_{\text{total}} + S_{\text{tanque}} + 2 \cdot S_{\text{cubeto}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 23})$$

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 4,724 + 1,7 + 2 \cdot 2,5 = 16,129 \text{ m}$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto. En este caso como todos los tanques son iguales (180 m^3), el volumen mínimo que tiene que almacenar el cubeto es de 180 m^3 .

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$A_{\text{ocupada}} = \left[\left(\frac{NT}{2}\right) \cdot D_{\text{total}} + S_{\text{tanque}} \cdot \left(\frac{NT}{2} - 1\right)\right] \cdot (2 \cdot D_{\text{total}} + S_{\text{tanque}}) \quad (\text{Ec. 11. 1. 24})$$

$$A_{\text{ocupada}} = \left[\left(\frac{5}{2}\right) 4,724 + 1,7 \cdot \left(\frac{5}{2} - 1\right)\right] \cdot (2 \cdot 4,724 + 1,7) = 159,489 \text{ m}^2$$

El área libre es,

$$A_{\text{libre}} = L_{\text{cubeto}} \cdot W_{\text{cubeto}} - A_{\text{ocupada}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 25})$$

$$A_{\text{libre}} = 19,331 \cdot 16,129 - 159,489 = 152,300 \text{ m}^2$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{V_{\text{tanque}}}{A_{\text{libre}}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 26})$$

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{180}{152,300} = 1,182 \text{ m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar 15\%}} H_{\text{cubeto}} = 1,359 \text{ m}$$

11.1.1.7.- Peso total equipo almacenamiento

Para poder saber el peso del equipo entero, hay que saber el peso de:

- Peso cabezal inferior plano
- Peso lateral del tanque (parte cilíndrica)
- Peso cabezal superior tanque

Y luego añadir el peso de la sustancia almacenada.

- Peso cabezal inferior plano

Primero se calcula el área del fondo del cabezal inferior plano:

$$A_{\text{fondo}} = \pi \cdot r^2 \quad (\text{Ec. 11. 1. 27})$$

$$A_{\text{fondo}} = \pi \cdot \left(\frac{4,614}{2}\right)^2 = 16,720 \text{ m}^2$$

Y ahora ya se puede determinar el peso de esta parte siendo:

$$P_{\text{fondo}} = A_{\text{fondo}} \cdot t_{\text{fondo}} \cdot \rho_{\text{acer}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 28})$$

$$P_{\text{fondo}} = 16,720 \cdot 0,008 \cdot 7800 = 1043,306 \text{ Kg}$$

Se consulta bibliográficamente la densidad del acero inoxidable AISI304, y es de 7800 kg/m³.

- Peso lateral tanque (parte cilíndrica)

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot D \cdot h_{\text{cilindro}} \cdot t_{\text{cilindro}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 29})$$

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 4,614 \cdot 9,228 \cdot 0,005 \cdot 7800 = 5216,530 \text{Kg}$$

- Peso cabezal superior

Primero se calcula el volumen de acero del cabezal superior:

$$V_{\text{acero}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (r + t_{\text{cabezal}})^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (\text{Ec. 11. 1. 30})$$

$$V_{\text{acero}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{4,614}{2} \right) + 0,004 \right)^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{4,614}{2} \right)^3 = 0,134 \text{ m}^3$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{cabezal}} = V_{\text{acero}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 31})$$

$$P_{\text{cabezal}} = 0,134 \cdot 7800 = 1045,116 \text{ Kg}$$

- Peso tanque vacío

$$P_{\text{vacío}} = P_{\text{fondo}} + P_{\text{cilindro}} + P_{\text{cabezal}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 32})$$

$$P_{\text{vacío}} = 1043,306 + 5216,530 + 1045,116 = 7304,952 \text{ Kg}$$

- Peso tanque lleno de agua

$$P_{\text{con agua}} = P_{\text{vacío}} + (V_{\text{líquido}}^{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}}) \quad (\text{Ec. 11. 1. 33})$$

$$P_{\text{operativo}} = 7304,952 + (186,124 \cdot 1000) = 193428,952 \text{ Kg}$$

- Peso tanque en operación (lleno de acrilonitrilo)

$$P_{\text{operativo}} = P_{\text{vacío}} + (V_{\text{líquido}}^{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{líquido}}) \quad (\text{Ec. 11. 1. 34})$$

$$P_{\text{operativo}} = 7304,952 + (186,124 \cdot 810) = 158065,392 \text{ Kg}$$

11.1.1.8.- Especificaciones de los tanques de acrilonitrilo

Para concluir el este punto del diseño de los tanques de acrilonitrilo se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad.

Tabla 11.1.2.- Características tanques almacenamiento acrilonitrilo

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO		
Características tanque		
Producción diaria	186	m3/día
Días stock	4	días
Temperatura diseño	41	°C
Presión diseño	218248,6	Pa
Volumen tanque cilíndrico	180	m3
Diámetro total tanque	4,7	m
Altura total tanque	11,5	m
% Volumen ocupado	83	%
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304	
Aislante	Lana de roca de 50mm de espesor	
Espesor cilindro	5	mm
Espesor cabezal semiesférico	4	mm
Espesor fondo plano	8	mm
Capacidad total de venteo	8886	m3/h
Dimensiones cubeto retención		
Longitud cubeto	19	m
Altura cubeto	1,4	m
Anchura cubeto	16	m
Peso tanque		
Peso total tanque operativo	158065	Kg

11.1.2.- Almacenamiento de materias primeras: Propileno11.1.2.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

El propileno, debido a sus características físicas y químicas, se almacenará como líquido en tanques esféricos a alta presión y temperatura de 32°C. Esta sustancia debe de cumplir la normativa MIE-APQ-001, ya que se trata de una sustancia inflamable y combustible que pertenece al subgrupo A2.

A la hora de dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de 2 días (tiempo de stock). Hay que tener en cuenta que el propileno llegará a la planta de acrilonitrilo por tuberías des de la Repsol petróleo. Será la misma empresa suministradora que tendrá unos tanques de reserva para que el suministro a la planta receptora no falle. El aumento del tiempo de residencia supondría incrementar el volumen de los tanques de almacenaje, y por lo tanto un problema de espacio en la planta.

La cantidad de propileno que se necesita diariamente es de 485,972 m³/día. Como se ha comentado anteriormente, el tiempo de residencia fijado es de 2 días.

$$V_{\text{stock}} = 2 \cdot 485,972 = 971,944 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11.1.2)}$$

Por tanto, el volumen de reactivo a almacenar durante este tiempo es de 971,944 m³. Para realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento, se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, tal y como se muestra seguidamente:

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 971,944 \cdot (1 + 0,15) = 1117,736 \text{ m}^3$$

Ahora se calcula el número de tanques necesarios para almacenar el reactivo durante 2 días. Se escoge un volumen de tanque de 300 m³ y con el volumen de líquido ya sobredimensionado se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{1117,736}{300} = 3,726 \cong 4 \text{ tanques (Ec. 11.1.3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{971,944}{4}}{300} = 80,995 \text{ (Ec. 11.1.4)}$$

11.1.2.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando el volumen de los tanques a 300 m³ y sabiendo que son esféricos se calcula el radio de estos.

$$V_{\text{tanque}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \quad (\text{Ec. 11.1.35})$$

$$V_{\text{tanque}} \xrightarrow{\text{aislando } r} r = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{tanque}} \cdot 3}{4 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{300 \cdot 3}{4 \cdot \pi}} = 4,15 \text{ m}$$

Así que el diámetro del tanque esférico será de 8,30 m.

11.1.2.3.- Diseño mecánico tanque

El diseño de los tanques de propileno siguen la normativa ASME y la norma ITC MIE-APQ 1 (almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles). Dentro de la normativa ITC MIE-APQ 1. El propileno está clasificado como un producto de subclase A2.

También hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño. La temperatura de operación se ha encontrado bibliográficamente.

$$T_{\text{diseño}} = 32 + 20 = 52^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11.1.9})$$

- Material de los tanques

Para la construcción de los tanques de propileno se ha escogido el acero inoxidable AISI304, que según la empresa *Harrington Industrial Plastics*, este tiene una compatibilidad con el propileno catalogada de excellent.

- Calculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1 \text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

Primero se debe de conocer la presión de diseño. La presión de operación se ha encontrado bibliográficamente y es:

$$P_{\text{operación}} = 14,8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 1,45 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

A continuación se calcula la altura de líquido para poder determinar la presión que ejerce este sobre el tanque:

$$V_{\text{líquido}} = V_{\text{tanque}} \cdot \left[\frac{h^2 \cdot (3r - h)}{4r^3} \right] \quad (\text{Ec. 11. 1. 36})$$

$$V_{\text{líquido}} = V_{\text{tanque}} \cdot \left[\frac{h^2 \cdot (3r - h)}{4r^3} \right] \rightarrow 485,972 = 300 \cdot \left[\frac{h^2 \cdot (3 \cdot 4,15 - h)}{4 \cdot (4,15)^3} \right] \xrightarrow{\text{solver}}$$

$$h_{\text{líquido}} = 8,124 \text{ m}$$

Conociendo la densidad del propileno, a la temperatura deseada (mediante Hysys), que es de 494,61 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 494,61 \cdot 9,81 \cdot 8,124 = 39418,656 \text{ Pa} \quad (\text{Ec. 11. 1. 11})$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 39418,656 + 1,45 \cdot 10^6 = 1,49 \cdot 10^6 \text{ Pa} \quad (\text{Ec. 11. 1. 12})$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%,

$$P_{\text{diseño}} = 1,49 \cdot 10^6 * (1 + 0,15) = 1,71 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Finalmente, se calcula el espesor del tanque esférico, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)
- E: factor de soldadura (1,00 ya que se trata de un tanque a presión)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{esférico}} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot R}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 * P_{\text{diseño}}} + C_1 \quad (\text{Ec. 11. 1. 37})$$

$$t_{\text{esférico}} = \frac{1,71 \cdot 10^6 \cdot 4,150}{2 \cdot 1 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 \cdot 1,71 \cdot 10^6} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,0193 \text{ m} = 19,315 \text{ mm}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del tanque calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{esférico}}^{\text{final}} = \overbrace{t_{\text{esférico}} \cdot 0,10}^{C_2} + t_{\text{esférico}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 38})$$

$$t_{\text{esférico}}^{\text{final}} = \overbrace{19,315 \cdot 0,10}^{C_2} + t_{\text{esférico}} = 19,315 + 1,931 = 21,246 \text{ mm} \rightarrow 30 \text{ mm}$$

Se buscan espesores que sean comerciales, por eso se redondea a un espesor de 30 mm.

11.1.2.4.- Cálculo del venteo total para líquidos

El recipiente de almacenamiento debe de disponer de sistemas de venteo para prevenir su deformación. El sistema de venteo debe de tener un diámetro mínimo de 35 mm y siempre igual o superior al tamaño de la tubería que llena o vacía el tanque. Este recipiente de almacenamiento también debe disponer de un dispositivo que permite aligerar un exceso de presión interna.

Primero se calcula la superficie húmeda del tanque:

$$A_{\text{húmeda}} = 4 \cdot \pi \cdot 4,15^2 = 216,720 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 11. 1. 17})$$

Seguidamente se calcula el calor recibido en caso de fuego externo:

$$Q_{\text{fuego}} = 139,7 \cdot 1 \cdot 216,720^{0,82} \cdot 10^3 = 1,150 \cdot 10^7 \text{ KJ/h} \quad (\text{Ec. 11. 1. 18})$$

Conociendo el calor latente de vaporización del propileno a la temperatura deseada, se calcula la capacidad de venteo:

$$C_{\text{venteo}} = \frac{4,414 \cdot 1,150 \cdot 10^7}{358,11 \cdot \sqrt{42,081}} = 21847,707 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{Ec. 11. 1. 19})$$

11.1.2.5.- Aislamiento

El tanque de almacenamiento de propileno debe de estar aislado térmicamente mediante lana de roca con un espesor de 50 mm. Este aislante aparte de ser un buen aislante, es incombustible. Se decide escoger la empresa *Isover* para que proporcione este aislante. El aislante escogido es el llamado *Spintex HP-353*.

11.1.2.6.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios.

Según la normativa MIE-APQ-001, todo recipiente que contenga sustancias inflamables y corrosivas, tiene la obligación de tener unos cubetos de retención de líquidos por si hay algún tipo de fuga. Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa y el espesor del aislante escogido:

$$D_{\text{total}} = 8,30 + (2 \cdot 0,03) + (2 \cdot 0,05) = 8,466 \text{ m} \quad (\text{Ec. 11. 1. 20})$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 2 metros entre tanques. Se elige la distancia de separación entre cubeto y tanque y entre tanques de 2 m (S_{tanque}).

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{4}{2}\right) \cdot 8,466 + 2 \cdot \left(\frac{4}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 23,931 \text{ m} \quad (\text{Ec. 11. 1. 22})$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 8,466 + 2 + 2 \cdot 2,5 = 23,931 \text{ m} \quad (\text{Ec. 11. 1. 23})$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto. En este caso como todos los tanques son iguales (300 m^3), el volumen mínimo que tiene que almacenar el cubeto es de 300 m^3 .

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$\begin{aligned} A_{\text{ocupada}} &= \left[\left(\frac{4}{2}\right) \cdot 8,466 + 2 \cdot \left(\frac{4}{2} - 1\right) \right] \cdot (2 \cdot 8,466 + 2) \\ &= 358,395 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 11. 1. 24}) \end{aligned}$$

El área libre es,

$$A_{\text{libre}} = 23,931 \cdot 23,931 - 358,395 = 214,313 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 11. 1. 25})$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{300}{214,313} = 1,400 \text{ m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar 15\%}} H_{\text{cubeto}} = 1,610 \text{ m} \quad (\text{Ec. 11. 1. 26})$$

11.1.2.7.- Peso total equipo almacenamiento

Primero se calcula el peso del equipo vacío y luego se añade el peso de la sustancia almacenada.

Primero se calcula el volumen de acero del tanque:

$$V_{\text{acero}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (r + t_{\text{esférico}}^{\text{final}})^3}{3} - \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \quad (\text{Ec. 11.1.39})$$

$$V_{\text{acero}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (4,15 + 0,03)^3}{3} - \frac{4 \cdot \pi \cdot (4,15)^3}{3} = 6,549 \text{ m}^3$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{esférico}} = V_{\text{acero}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad (\text{Ec. 11.1.40})$$

$$P_{\text{esférico}} = 6,549 \cdot 7800 = 51079,626 \text{ Kg}$$

Este peso calculado corresponde al peso del tanque vacío, así que ahora se calcula el peso de este cuando está lleno de propileno. Se conoce que la densidad del líquido es de 494,61 Kg/m³.

$$P_{\text{operativo}} = 51079,626 + (485,972 \cdot 494,61) = 291446,298 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 11.1.34})$$

11.1.2.8.- Especificaciones de los tanques de propileno

Para concluir el este punto del diseño de los tanques esféricos de propileno se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.3.- Características tanques almacenamiento propileno

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	486 m ³ /día
Días stock	2 días
Temperatura diseño	52 °C
Presión diseño	1,71E+06 Pa
Volumen tanque esférico	300 m ³
Diámetro total tanque	8,5 M
% Volumen ocupado	81 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304
Aislante	Lana de roca de 50mm de espesor
Espesor tanque esférico	30 Mm
Capacidad total de venteo	21848 m ³ /h
Dimensiones cubeto retención	
Longitud cubeto	24 M
Altura cubeto	2 M
Anchura cubeto	24 M
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	291446 Kg

11.1.3.- Almacenamiento de materias primas: Amoníaco anhidro

11.1.3.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

El amoníaco anhidro, debido a sus características físicas y químicas, se almacenará como líquido en tanques esféricos a alta presión y temperatura de 32°C. Esta sustancia debe de cumplir la normativa MIE-APQ. 004. ya que es toxica.

A la hora de dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de 2 días (tiempo de stock). Hay que tener en cuenta que el amoniaco llegará a la planta de acrilonitrilo por tuberías des de la empresa Terquimsa. Será la misma empresa suministradora, que tendrá unos tanques de reserva para que el subministro a la planta receptora no falle. Esta en concreto dispone de un tanque criogénico de 10.000t de almacenamiento de amoniaco.

El aumento del tiempo de residencia supondría incrementar el volumen de los tanques de almacenaje, y por lo tanto un problema de espacio en la planta.

La cantidad de amoníaco que se necesita diariamente es de 198,390 m³/día. Como se ha comentado anteriormente, el tiempo de residencia fijado es de 2 días.

$$V_{\text{stock}} = 2 \cdot 198,390 = 396,779 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 2)}$$

Por tanto, el volumen de reactivo a almacenar durante este tiempo es de 396,779 m³.

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, tal y como se muestra seguidamente:

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 396,779 \cdot (1 + 0,15) = 456,296 \text{ m}^3$$

Ahora, se calcula el número de tanques necesarios para almacenar el reactivo durante 2 días.

Se escoge un volumen de tanque de 250 m³ y con el volumen de líquido ya sobredimensionado se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{456,296}{250} = 1,825 \cong 2 \text{ tanques (Ec. 11. 1. 3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{396,779}{2}}{250} = 79,356 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.3.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando el volumen de los tanques a 250m³ y sabiendo que son esféricos se calcula el radio de estos:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \xrightarrow{\text{aislando } r} r = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{tanque}} \cdot 3}{4 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{250 \cdot 3}{4 \cdot \pi}} = 3,91 \text{ m (Ec. 11. 1. 35)}$$

11.1.3.3.- Diseño mecánico tanque

El diseño de los tanques de amoníaco anhidro, siguen la normativa ASME y la norma ITC MIE-APQ.004. También hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño. La temperatura de operación se ha encontrado bibliográficamente.

$$T_{\text{diseño}} = 32 + 20 = 52^{\circ}\text{C} \text{ (Ec. 11. 1. 9)}$$

- Material de los tanques

Para la construcción de los tanques de amoniaco se ha escogido el acero inoxidable AISI304, que según la empresa *Harrington Industrial Plastics*, este tiene una compatibilidad con el amoniaco catalogada de excellent.

- Cálculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1 \text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

Primero se debe de conocer la presión de diseño. La presión de operación se ha encontrado bibliográficamente y es:

$$P_{\text{operación}} = 13,2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 1,27 \cdot 10^6 \text{Pa}$$

A continuación se calcula la altura de líquido para poder determinar la presión que ejerce este sobre el tanque:

$$V_{\text{líquido}} = V_{\text{tanque}} \cdot \left[\frac{h^2 \cdot (3r - h)}{4r^3} \right] \text{ (Ec. 11. 1. 36)}$$

$$\rightarrow 198,390 = 250 \cdot \left[\frac{h^2 \cdot (3 \cdot 3,91 - h)}{4 \cdot (3,91)^3} \right] \xrightarrow{\text{solver}}$$

$$h_{\text{líquido}} = 5,534 \text{ m}$$

Conociendo la densidad del amoníaco anhidro, a la temperatura deseada (mediante Hysys), que es de $588,39 \text{ kg/m}^3$, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 588,39 \cdot 9,81 \cdot 5,534 = 31942,834 \text{ Pa} \quad (\text{Ec. 11. 1. 11})$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 31942,834 + 1,27 \cdot 10^6 = 1,31 \cdot 10^6 \text{ Pa} \quad (\text{Ec. 11. 1. 12})$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%,

$$P_{\text{diseño}} = 1,31 \cdot 10^6 * (1 + 0,15) = 1,50 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Finalmente, se calcula el espesor del tanque esférico, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)
- E: factor de soldadura (1,00 ya que se trata de un tanque a presión)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{esférico}} = \frac{1,50 \cdot 10^6 \cdot 3,910}{2 \cdot 1 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 * 1,50 \cdot 10^6} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,0162 \text{ m}$$

$$= 16,194 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 11. 1. 37})$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del tanque calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{esférico}}^{\text{final}} = \overbrace{16,194}^{C_2 * 0,10} + t_{\text{esférico}} = 16,194 + 1,619 = 17,813 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 20 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 11. 1. 38})$$

Se buscan espesores que sean comerciales, por eso se redondea a un espesor de 20 mm.

11.1.3.4.- Calculo del venteo total para líquidos

El recipiente de almacenamiento debe de disponer de sistemas de venteo para prevenir su deformación. El sistema de venteo debe de tener un diámetro mínimo de

35 mm y siempre igual o superior al tamaño de la tubería que llena o vacía el tanque. Este recipiente de almacenamiento también debe disponer de un dispositivo que permite aligerar un exceso de presión interna.

Primero se calcula la superficie húmeda del tanque:

$$A_{\text{húmeda}} = 4 \cdot \pi \cdot 3,91^2 = 191,916 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 11. 1. 17})$$

Seguidamente se calcula el calor recibido en caso de fuego externo:

$$Q_{\text{fuego}} = 139,7 \cdot 1 \cdot 191,916^{0,82} \cdot 10^3 = 1,041 \cdot 10^7 \text{ KJ/h} \quad (\text{Ec. 11. 1. 18})$$

Conociendo el calor latente de vaporización del reactivo a la temperatura deseada, se calcula la capacidad de venteo:

$$C_{\text{venteo}} = \frac{4,414 \cdot 1,041 \cdot 10^7}{1185,1 \cdot \sqrt{17,030}} = 9393,280 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{Ec. 11. 1. 19})$$

11.1.3.5.- Aislamiento

El tanque de almacenamiento de amoniaco debe de estar aislado térmicamente mediante lana de roca con un espesor de 50 mm. Este aislante aparte de ser un buen aislante, es incombustible. Se decide escoger la empresa *Isover* para que proporcione este aislante. El aislante escogido es el llamado *Spintex HP-353*.

11.1.3.6.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles y corrosivos, deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios. Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa y el espesor del aislante escogido:

$$D_{\text{total}} = 7,816 + (2 \cdot 0,02) + (2 \cdot 0,05) = 7,956 \text{ m (Ec. 11. 1. 20)}$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 2 metros entre tanques. Se elige la distancia de separación entre cubeto y tanque y entre tanques de 2 m (S_{tanque}).

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{2}{2}\right) \cdot 7,816 + 2 \cdot \left(\frac{2}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 12,956 \text{ m (Ec. 11. 1. 22)}$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 7,816 + 2 + 2 \cdot 2,5 = 22,912 \text{ m (Ec. 11. 1. 23)}$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto. En este caso como todos los tanques son iguales (250 m^3), el volumen mínimo que tiene que almacenar el cubeto es de 250 m^3 .

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$A_{\text{ocupada}} = \left[\left(\frac{2}{2}\right) \cdot 7,816 + 2 \cdot \left(\frac{2}{2} - 1\right)\right] \cdot (2 \cdot 7,816 + 2) = 142,505 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 24)}$$

El área libre es,

$$A_{\text{libre}} = 12,956 \cdot 22,912 - 142,505 = 154,339 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 25)}$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{250}{214,313} = 1,620 \text{ m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar 15\%}} H_{\text{cubeto}} = 1,863 \text{ m (Ec. 11. 1. 26)}$$

11.1.3.7.- Peso total equipo almacenamiento

Primero se calcula el peso del equipo vacío y luego se añade el peso de la sustancia almacenada.

Primero se calcula el volumen de acero del tanque:

$$V_{\text{acero}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (3,91 + 0,02)^3}{3} - \frac{4 \cdot \pi \cdot (3,91)^3}{3} = 5,802 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 39)}$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{esférico}} = 5,802 \cdot 7800 = 45253,931 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 40)}$$

Este peso calculado corresponde al peso del tanque vacío, así que ahora se calcula el peso de este cuando está lleno de amoníaco anhidro. Se conoce que la densidad del líquido es de 588,39 Kg/m³.

$$P_{\text{operativo}} = 45253,931 + (198,390 \cdot 588,39) = 161984,363 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 34)}$$

11.1.3.8.- Especificaciones de los tanques de amoníaco anhidro

Para concluir el este punto del diseño de los tanques esféricos de amoníaco anhidro se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.4.- Características tanques almacenamiento amoníaco anhidro

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	198 m ³ /día
Días stock	2 días
Temperatura diseño	52 °C
Presión diseño	1,50E+06 Pa
Volumen tanque esférico	250 m ³
Diámetro total tanque	8 M
% Volumen ocupado	79 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304
Aislante	Lana de roca de 50mm de espesor
Espesor tanque esférico	20 Mm
Capacidad total de venteo	9393 m ³ /h
Dimensiones cubeto retención	
Longitud cubeto	13 M
Altura cubeto	2 M
Anchura cubeto	23 M
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	161984 Kg

11.1.4.- Almacenamiento del subproducto: Ácido cianhídrico

11.1.4.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

En este apartado se recoge el diseño de los tanques de almacenamiento de ácido cianhídrico (99,99% de pureza en masa) en estado líquido y a temperatura ambiente. Este se diseña a presión ya que se trata de un líquido muy volátil con un punto de ebullición muy bajo, de 26°C.

Esta sustancia debe cumplir la normativa ITC MIE APQ. 001 y APQ. 007 ya que es un inflamable y tóxico. Corresponde según esta a la subclase B1.

El volumen de ácido cianhídrico que se produce diariamente es de 53,280 m³/día y se ha fijado un tiempo de residencia de 4 días. Así que el volumen de stock es:

$$V_{\text{stock}} = 4 \cdot 53,280 = 213,120\text{m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 2)}$$

Por tanto, el volumen de producto a almacenar durante este tiempo es de 213,120 m³. A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, tal y como se muestra seguidamente:

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 213,120 \cdot (1 + 0,15) = 255,744 \text{ m}^3$$

Ahora, se calcula el número de tanques necesarios para almacenar el reactivo durante los 4 días.

Se escoge un volumen de tanque de 300 m³ y con el volumen de líquido ya sobredimensionado se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{255,744}{300} = 0,852 \cong 1 \text{ tanques (Ec. 11. 1. 3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{213,120}{1}}{300} = 71,040 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.4.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando el volumen de tanque a 300 m³ y sabiendo que son esféricos se calcula el radio de estos:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \xrightarrow{\text{aislando } r} r = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{tanque}} \cdot 3}{4 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{300 \cdot 3}{4 \cdot \pi}} = 4,15 \text{ m (Ec. 11. 1. 35)}$$

11.1.4.3.- Diseño mecánico tanque

El diseño de los tanques de ácido cianhídrico, siguen la normativa ASME y la norma ITC MIE-APQ.001.

También hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño. La temperatura de operación se ha encontrado bibliográficamente.

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^{\circ}\text{C (Ec. 11. 1. 9)}$$

- Material de los tanques

Para la construcción de los tanques de amoniaco se ha escogido el acero inoxidable AISI304, que según la empresa *Harrington Industrial Plastics*, este tiene una compatibilidad con el amoniaco catalogada de excellent.

- Cálculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1 \text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

Primero se debe de conocer la presión de diseño. La presión de operación se ha encontrado bibliográficamente y es:

$$P_{\text{operación}} = 5 \cdot 10^5 \text{Pa}$$

A continuación se calcula la altura de líquido para poder determinar la presión que ejerce este sobre el tanque:

$$\begin{aligned} V_{\text{líquido}} &= V_{\text{tanque}} \cdot \left[\frac{h^2 \cdot (3r - h)}{4r^3} \right] \text{ (Ec. 11. 1. 36)} \rightarrow 213,120 \\ &= 300 \cdot \left[\frac{h^2 \cdot (3 \cdot 4,15 - h)}{4 \cdot (4,15)^3} \right] \xrightarrow{\text{solver}} \\ h_{\text{líquido}} &= 5,347 \text{ m} \end{aligned}$$

Conociendo la densidad del ácido cianhídrico, a la temperatura deseada (mediante Hysys), que es de 687,64 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 687,64 \cdot 9,81 \cdot 5,347 = 36069,517 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 11)}$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 36069,517 + 5 \cdot 10^5 = 5,36 \cdot 10^5 \text{Pa (Ec. 11. 1. 12)}$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%,

$$P_{\text{diseño}} = 5,36 \cdot 10^5 * (1 + 0,15) = 6,16 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Finalmente, se calcula el espesor del tanque esférico, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)
- E: factor de soldadura (1,00 ya que se trata de un tanque a presión)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{esférico}} = \frac{6,16 \cdot 10^5 \cdot 4,150}{2 \cdot 1 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 * 6,16 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,0079 \text{ m}$$

$$= 7,902 \text{ mm (Ec. 11. 1. 37)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del tanque calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{esférico}}^{\text{final}} = \overbrace{7,902 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{esférico}} = 7,902 + 0,790 = 8,692 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 10 \text{ mm (Ec. 11. 1. 38)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales, por eso se redondea a un espesor de 10 mm.

11.1.4.4.- Calculo del venteo total para líquidos

El tanque de ácido cianhídrico como ya se ha comentado, se encuentra a presión. Se dispone de un equipo scrubber para tratar el venteo de este, ya que es una sustancia muy peligrosa y no puede ir a la atmosfera.

11.1.4.5.- Aislamiento

El tanque de almacenamiento de amoniaco debe de estar aislado térmicamente mediante lana de roca con un espesor de 50 mm. Este aislante aparte de ser un buen

aislante, es incombustible. Se decide escoger la empresa Isover para que proporcione este aislante. El aislante escogido es el llamado *Spintex HP-353*.

11.1.4.6.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles y corrosivos, deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios. Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa y el espesor del aislante escogido:

$$D_{\text{total}} = 8,30 + (2 \cdot 0,01) + (2 \cdot 0,05) = 8,426 \text{ m (Ec. 11. 1. 20)}$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 2 metros entre tanques. Se elige la distancia de separación entre cubeto y tanque y entre tanques de 2 m (S_{tanque}).

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 8,426 + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 8,213 \text{ m (Ec. 11. 1. 22)}$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 8,426 + 2 + 2 \cdot 2,5 = 23,851 \text{ m (Ec. 11. 1. 23)}$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto.

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$A_{\text{ocupada}} = \left[\left(\frac{1}{2} \right) \cdot 8,426 + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1 \right) \right] \cdot (2 \cdot 8,426 + 2) = 60,566 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 24)}$$

El área libre es,

$$A_{\text{libre}} = 8,213 \cdot 23,851 - 60,566 = 135,321 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 25)}$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{300}{135,321} = 2,217 \text{ m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar 15\%}} H_{\text{cubeto}} = 2,549 \text{ m (Ec. 11. 1. 26)}$$

11.1.4.7.- Peso total equipo almacenamiento

Primero se calcula el peso del equipo vacío y luego se añade el peso de la sustancia almacenada.

Primero se calcula el volumen de acero del tanque:

$$V_{\text{acero}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (4,15 + 0,01)^3}{3} - \frac{4 \cdot \pi \cdot (4,15)^3}{3} = 2,172 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 39)}$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{esférico}} = 2,172 \cdot 7800 = 16944,871 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 40)}$$

Este peso calculado corresponde al peso del tanque vacío, así que ahora se calcula el peso de este cuando está lleno de amoníaco anhidro. Se conoce que la densidad del líquido es de 687,64 Kg/m³.

$$P_{\text{operativo}} = 45253,931 + (53,280 \cdot 687,64) = 53582,330 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 34)}$$

11.1.4.8.- Especificaciones del tanque de ácido cianhídrico

Para concluir el este punto del diseño de los tanques esféricos de amoníaco anhidro se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.5.- Características tanques almacenamiento ácido cianhídrico

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	53 m ³ /día
Días stock	4 días
Temperatura diseño	41 °C
Presión diseño	616472,2 Pa
Volumen tanque esférico	300 m ³
Diámetro total tanque	8,4 M
% Volumen ocupado	71 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304
Aislante	Lana de roca de 50mm de espesor
Espesor tanque esférico	10 mm
Capacidad total de venteo	10702 m ³ /h
Dimensiones cubeto retención	
Longitud cubeto	8 M
Altura cubeto	3 M
Anchura cubeto	24 M
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	53582 Kg

11.1.5.- Almacenamiento del reactivo: Ácido sulfúrico11.1.5.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

En este apartado se recoge el diseño de los tanques de almacenamiento de ácido sulfúrico (35% de pureza en masa) en estado líquido y a temperatura ambiente.

A la hora de dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de 6 días (tiempo de stock). Hay que tener en cuenta que el transporte de ácido sulfúrico, se efectúa por carretera mediante camiones y por lo tanto se considera un tiempo de

residencia suficiente por si el reactivo no pudiera ser suministrado debido a problemas ajenos a la propia planta.

El volumen de reactivo que se requiere diariamente es de 242,104 m³/día. Como se ha comentado anteriormente, el tiempo de residencia fijado es de 6 días. Por tanto, el volumen de reactivo a almacenar durante este tiempo es de 1452,625 m³. El reactivo se será recibido en camiones cisterna con una capacidad de 30 m³. Se prevé un stock de 6 días, para tener en cuenta vagas en el transporte y otros contratiempos.

A continuación, se muestra el cálculo del número de camiones necesarios para suministrar el reactivo en la planta.

- Número de camiones diarios:

Para conocer el número de camiones diarios que necesita la planta, se debe conocer el volumen diario requerido de ácido y el volumen del camión cisterna.

$$\text{N}^{\circ} \text{ camiones diarios} = \frac{242,104}{30} = 8,070 \cong 8 \text{ camiones/día (Ec. 11. 1. 1)}$$

Se debe tener en cuenta que en un día laboral los camiones pueden ir a la planta durante 12h (horario de 8h a 20h).

También se debe conocer el volumen de stock que se tendrá:

$$V_{\text{stock}} = 6 \cdot 242,104 = 1452,625 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 2)}$$

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, tal y como se muestra seguidamente:

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 1452,625 \cdot (1 + 0,15) = 1670,519 \text{ m}^3$$

Ahora se calcula el número de tanques necesarios para almacenar el reactivo durante 6 días.

- Número de tanques de almacenamiento:

Se escoge un volumen de tanque de 350m^3 y con el volumen de líquido ya sobredimensionado se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{1670,519}{350} = 4,773 \cong 5 \text{ tanques (Ec. 11. 1. 3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{1452,625}{350} = 83,007 \cong 83 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.5.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando un volumen de tanque de 350 m^3 , teniendo en cuenta la relación de altura-diámetro ($H/D=2$) y sabiendo que la proporción de la altura del cabezal semiesférico con el diámetro del tanque es de la mitad, se dimensiona el tanque real cilíndrico.

$$\text{Se conoce que } \begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} \\ h_{\text{cabezal}} = D_{\text{tanque}}/2 \end{cases}$$

El volumen real del tanque es la suma del volumen del cilindro más el volumen de los dos cabezales. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

Sustituyendo esta relación a la ecuación de volumen total del tanque y aislando el diámetro se determina este parámetro:

$$\begin{aligned} V_{\text{tanque}} &= V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} = \\ &= \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int,tanque}}^2 \cdot 2 \cdot D_{\text{int,tanque}} \right] + \left[\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{int,tanque}}}{2} \right)^3 \right] \\ &= 350 \xrightarrow{\text{aislando } D} D_{\text{int,tanque}} = 5,759 \text{ m (Ec. 11. 1. 5)} \end{aligned}$$

Hace falta remarcar que estos tanques de ácido sulfúrico se deberán construir in situ ya que superan los 4m de diámetro.

Se calcula el volumen del cabezal del cilindro. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

$$V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{5,759}{2}\right)^3 = 50 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11.1.6)}$$

El volumen del cilindro será:

$$V_{\text{cilindro}} = 350 - 50 = 300 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11.1.7)}$$

A continuación, se calcula la altura total del tanque:

$$h_{\text{tanque}} = 11,518 + 2,879 = 14,397 \text{ m (Ec. 11.1.8)}$$

11.1.5.3.- Diseño mecánico tanque

Por el diseño de los tanques de ácido sulfúrico se sigue la norma ITC MIE-APQ.006 (almacenamiento de sustancias corrosivas).

También hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C:

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^\circ\text{C (Ec. 11.1.9)}$$

- Material de los tanques

Para la construcción de los tanques de ácido sulfúrico se ha escogido el acero inoxidable AISI316, que según la empresa *Harrington Industrial Plastics*, *este tiene* una compatibilidad con el ácido sulfúrico (80%) catalogada de Good, menor effect.

- Calculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI316, se extrae bibliográficamente, el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{ mm}^2}{1 \text{ m}^2} = 2,20 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

- Parte cilíndrica

Primero se calcula la altura de líquido para poder calcular después, la variación de presión.

$$h_{\text{líquido}} = \frac{242,104}{\frac{\pi}{4} \cdot 5,759^2} = 9,295 \text{ m (Ec. 11. 1. 10)}$$

Conociendo la densidad del ácido, que se encuentra bibliográficamente, y es de 1256 kg/m³ se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 1256 \cdot 9,81 \cdot 9,295 = 114525,847 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 11)}$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 114525,847 + 101325 = 2,16 \cdot 10^5 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 12)}$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%

$$P_{\text{diseño}} = 2,16 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0,15) = 2,48 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Finalmente, se calcula el espesor del cilindro, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico material construcción (acero inoxidable AISI316) (atm)
- E: factor de soldadura (0,85)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{2,48 \cdot 10^5 \cdot 2,879}{0,85 \cdot 2,20 \cdot 10^8 - 0,6 \cdot 2,48 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00532 \text{ m}$$

$$= 5,325 \text{ mm (Ec. 11. 1. 13)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor de cilindro calculado y se suma a este para encontrar el espesor de cilindro final:

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = \overbrace{5,325 \cdot 0,10}^{C_2} + t_{\text{cilindro}} = 5,325 + 0,533 = 5,858 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 6 \text{ mm (Ec. 11. 1. 14)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 6 mm.

- Parte del cabezal superior semiesférico

En este caso, se calcula el espesor del cabezal con la misma expresión anterior pero aquí la presión de diseño es la presión atmosférica sobredimensionada 15%

$$t_{\text{cabezal}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 2,879}{2 \cdot 0,85 \cdot 2,20 \cdot 10^8 - 0,2 \cdot 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00329 \text{ m} = 3,295 \text{ (Ec. 11. 1. 15)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del cabezal calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{cabezal}}^{\text{final}} = \overbrace{3,295 \cdot 0,10}^{C_2} + t_{\text{cabezal}} = 3,295 + 0,329 = 3,624 \text{ mm}$$

→ 4 mm (Ec. 11. 1. 16)

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 4 mm.

- Fondo inferior

Bibliográficamente, se encuentra que el espesor debe de tener el acero es de 6,5 mm más la tolerancia a la corrosión. Así que el espesor será de 8 mm (t_{fondo}).

11.1.5.4.- Calculo del venteo total para líquidos

El recipiente de almacenamiento debe de disponer de sistemas de venteo para prevenir su deformación. El sistema de venteo debe de tener un diámetro mínimo de 35 mm y siempre igual o superior al tamaño de la tubería que llena o vacía el tanque. Este recipiente de almacenamiento también debe disponer de un dispositivo que permite aligerar un exceso de presión interna.

Primero se calcula la superficie húmeda del tanque:

$$A_{\text{húmeda}} = \pi \cdot 5,759 \cdot 14,397 = 260,470 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 17)}$$

Seguidamente se calcula el calor recibido en caso de fuego externo:

$$Q_{\text{fuego}} = 139,7 \cdot 1 \cdot 260,470^{0,82} \cdot 10^3 = 1,337 \cdot 10^7 \text{KJ/h (Ec. 11. 1. 18)}$$

El factor F, que es el factor de reducción sin dimensiones, es igual a la unidad.

Finalmente se calcula la capacidad de venteo:

$$C_{\text{venteo}} = \frac{4,414 \cdot 1,012 \cdot 10^7}{533,91 \cdot \sqrt{98,1}} = 11160,704 \text{ m}^3/\text{h (Ec. 11. 1. 19)}$$

El valor del calor latente de vaporización se busca en la bibliografía.

11.1.5.5.- Aislamiento

El tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico debe de estar aislado térmicamente mediante lana de roca con un espesor de 50 mm. Este aislante aparte de ser un buen aislante, es incombustible. Se decide escoger la empresa *Isover* para que proporcione este aislante. El aislante escogido es el llamado *Spintex HP-353*.

11.1.5.6.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios.

Según la normativa MIE-APQ-001 y MIE-APQ-006, todo recipiente que contenga sustancias inflamables y corrosivas, tiene la obligación de tener unos cubetos de retención de líquidos por si hay algún tipo de fuga.

Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa y el espesor del aislante escogido:

$$D_{\text{total}} = 5,759 + (2 \cdot 0,006) + (2 \cdot 0,05) = 5,871 \text{ m (Ec. 11. 1. 20)}$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 1,5 metro entre tanques. Como la generatriz en este caso supera el 1,75 ya que es de 2, la distancia entre tanques según la normativa será (D la semisuma de generatriz y diámetro):

$$S_{\text{tanques}} = 0,5 \cdot \frac{5,871 + 2}{2} = 2 \text{ m (Ec. 11. 1. 21)}$$

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{5}{2}\right) \cdot 5,871 + 2 \cdot \left(\frac{5}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 22,629 \text{ m (Ec. 11. 1. 22)}$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 5,871 + 2 + 2 \cdot 2,5 = 18,709 \text{ m (Ec. 11. 1. 23)}$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto. En este caso como todos los tanques son iguales (350 m^3), el volumen mínimo que tiene que almacenar el cubeto es de 350 m^3 .

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$A_{\text{ocupada}} = \left[\left(\frac{5}{2} \right) \cdot 5,871 + 2 \cdot \left(\frac{5}{2} - 1 \right) \right] \cdot (2 \cdot 5,871 + 2) = 241,677 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 24)}$$

$$A_{\text{libre}} = 22,629 \cdot 18,709 - 241,677 = 181,690 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 25)}$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{350}{181,690} = 1,926\text{m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar 15\%}} H_{\text{cubeto}} = 2,215 \text{ m (Ec. 11. 1. 26)}$$

11.1.5.7.- Peso total equipo almacenamiento

Para poder saber el peso del equipo entero, hay que saber el peso de:

- Peso cabezal inferior plano
- Peso lateral del tanque (parte cilíndrica)
- Peso cabezal superior tanque

Y luego añadir el peso de la sustancia almacenada.

- Peso cabezal inferior plano

Primero se calcula el área del fondo del cabezal inferior plano:

$$A_{\text{fondo}} = \pi \cdot \left(\frac{5,759}{2} \right)^2 = 26,047 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 27)}$$

Se ha encontrado bibliográficamente que la densidad del acero AISI316 es de 7980 Kg/m³.

Y ahora ya se puede determinar el peso de esta parte siendo:

$$P_{\text{fondo}} = 26,047 \cdot 0,008 \cdot 7980 = 1662,840 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 28)}$$

- Peso lateral tanque (parte cilíndrica)

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 5,759 \cdot 11,518 \cdot 0,006 \cdot 7980 = 9977,037 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 29)}$$

- Peso cabezal superior

Primero se calcula el volumen de acero del cabezal superior:

$$V_{\text{acero}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{5,759}{2} \right) + 0,004 \right)^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{5,759}{2} \right)^3 = 0,209 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 30)}$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{cabezal}} = 0,209 \cdot 7980 = 1665,151 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 31)}$$

- Peso tanque vacío

$$P_{\text{vacío}} = 1662,840 + 9977,037 + 1665,151 = 13305,072 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 32)}$$

- Peso tanque en operación (lleno de ácido sulfúrico)

$$P_{\text{operativo}} = 13305,072 + (242,104 \cdot 1256) = 317387,907 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 33)}$$

11.1.5.8.- Características tanques almacenamiento ácido sulfúrico

Para concluir el este punto del diseño de los tanques de ácido sulfúrico se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.6.- Características tanques almacenamiento ácido sulfúrico

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	242 m ³ /día
Días stock	6 días
Temperatura diseño	41 °C
Presión diseño	248228,5 Pa
Volumen tanque cilíndrico	350 m ³
Diámetro total tanque	5,9 m
Altura total tanque	14,4 m
% Volumen ocupado	83 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI316
Aislante	Lana de roca de 50mm de espesor
Espesor cilindro	6 mm
Espesor cabezal semiesférico	4 mm
Espesor fondo plano	8 mm
Capacidad total de venteo	11161 m ³ /h
Dimensiones cubeto retención	
Longitud cubeto	23 m
Altura cubeto	2,2 m
Anchura cubeto	19 m
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	317388 Kg

11.1.6.- Almacenamiento del subproducto sólido: Sulfato amónico

11.1.6.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

En este apartado se recoge el diseño de silos para el almacenamiento de del subproducto sólido sulfato de amonio a temperatura ambiente.

Al dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de 4 días (tiempo de stock). Hay que tener en cuenta que el transporte de del subproducto, se efectúa por carretera mediante camiones y por lo tanto, se prevé un stock de 6 días, para tener en cuenta vagas en el transporte y otros contratiempos.

El volumen de sólido que se genera diariamente es de 82,669 m³/día. Como se ha comentado anteriormente, el tiempo de residencia fijado es de 4 días. Por tanto, el

volumen de reactivo a almacenar durante este tiempo es de 326,674 m³. El producto será recogido en camiones.

A continuación, se muestra el cálculo del número de camiones necesarios para suministrar el reactivo en la planta.

- Número de camiones diarios:

Para conocer el número de camiones diarios, se considera que cada big-bag tiene una capacidad de 2000 Kg de sólido y un camión puede transportar 23000 Kg.

$$\begin{aligned} \text{N}^{\circ} \text{ camiones diarios} &= \frac{\text{Peso}_{\text{diario}}}{\text{Peso}_{\text{camión}}} = \frac{144553}{23000} = 6,285 \\ &\cong 7 \text{ camiones/día (Ec. 11. 1. 41)} \end{aligned}$$

Se debe tener en cuenta que en un día laboral los camiones pueden ir a la planta durante 12h (horario de 8h a 20h). También se debe conocer el volumen de stock que se tendrá:

$$V_{\text{stock}} = 4 \cdot 81,669 = 326,674 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 2)}$$

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, tal y como se muestra seguidamente:

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 326,674 \cdot (1 + 0,15) = 375,676 \text{ m}^3$$

Ahora se calcula el número de silos necesarios para almacenar el producto durante 4 días.

- Número de silos de almacenamiento:

Se escoge un volumen de tanque de 125 m³ y con el volumen de sólido ya sobredimensionado se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{375,676}{125} = 3,005 \cong 3 \text{ silos (Ec. 11. 1. 3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{326,674}{3}}{125} = 87,113 \cong 87 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.6.2.- Dimensionamiento silo

Fijando un volumen de tanque de 125 m^3 , teniendo en cuenta la relación de altura-diámetro ($H/D=1,5$) y sabiendo que la proporción de la altura del cono con el diámetro del tanque, se dimensiona el tanque real cilíndrico.

$$\text{Se conoce que } \begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 1,5 \cdot D_{\text{silo}} \\ h_{\text{cono}} = \frac{D_{\text{tanque}}}{2} \cdot \tan(\alpha) = \overbrace{\frac{D_{\text{silo}}}{2} \cdot \tan(\alpha)}^{\alpha=45^\circ} = D_{\text{silo}}/2 \end{cases}$$

El volumen real del tanque, es la suma del volumen del cilindro más el volumen de conos. El cabezal superior es plano.

Sustituyendo estas relaciones a la ecuación de volumen total del silo y aislando el diámetro se determina este parámetro:

$$\begin{aligned} V_{\text{silo}} &= V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cono}} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{silo}}^2 \cdot h_{\text{cilindro}} \right] + \left[\frac{\pi}{12} \cdot D_{\text{silo}}^2 \cdot h_{\text{cono}} \right] \text{ (Ec. 11. 1. 42)} \\ V_{\text{silo}} &= \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{silo}}^2 \cdot h_{\text{cilindro}} \right] + \left[\frac{\pi}{12} \cdot D_{\text{silo}}^2 \cdot h_{\text{cono}} \right] = 125 \xrightarrow{\text{aislando } D} D_{\text{silo}} \\ &= 4,570 \text{ m} \end{aligned}$$

Hace falta remarcar que estos silos se deberán construir in situ, ya que superan los 4m de diámetro.

Ahora ya se puede determinar la altura de cono y cilindro:

$$\begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 1,5 \cdot D_{\text{silo}} = 1,5 \cdot 4,570 = 6,855 \text{ m} \\ h_{\text{cono}} = D_{\text{silo}}/2 = 4,570/2 = 2,285 \text{ m} \end{cases}$$

Se calcula el volumen del cono y del cilindro.

$$V_{\text{cono}} = \frac{\pi}{12} \cdot D_{\text{siló}}^2 \cdot h_{\text{cono}} \quad (\text{Ec. 11.1.43})$$

$$V_{\text{cono}} = \frac{\pi}{12} \cdot 4,570^2 \cdot h_{\text{cono}} = 12,494 \text{ m}^3$$

El volumen del cilindro será:

$$V_{\text{cilindro}} = V_{\text{tanque}} - V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} \quad (\text{Ec. 11.1.44})$$

$$V_{\text{cilindro}} = 125 - 12,494 = 112,506 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula la altura total del tanque:

$$h_{\text{siló}} = h_{\text{cilindro}} + h_{\text{cono}} \quad (\text{Ec. 11.1.45})$$

$$h_{\text{siló}} = 6,855 + 2,285 = 9,140 \text{ m}$$

11.1.6.3.- Diseño mecánico tanque

Hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C:

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 11.1.9})$$

- Material de los tanques

Para la construcción de los silos se ha escogido el acero inoxidable AISI316.

- Cálculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI316, se extrae bibliográficamente, el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1 \text{m}^2} = 2,20 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

- Parte cilíndrica

Primero se calcula la altura de sólido para poder calcular después, la variación de presión.

$$h_{\text{sólido}} = \frac{V_{\text{sólido}}^{\text{tanque}}}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \quad (\text{Ec. 11. 1. 46})$$

$$h_{\text{sólido}} = \frac{81,669}{\frac{\pi}{4} \cdot 4,570^2} = 4,979 \text{ m}$$

Conociendo la densidad del sólido, que se encuentra bibliográficamente, y es de 1770 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el sólido en el tanque.

$$\Delta P = \rho_{\text{sólido}} \cdot g \cdot h_{\text{sólido}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 47})$$

$$\Delta P = 1770 \cdot 9,81 \cdot 4,979 = 86452,022 \text{ Pa}$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 86452,022 + 101325 = 1,88 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (\text{Ec. 11. 1. 12})$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%

$$P_{\text{diseño}} = 1,88 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0,15) = 2,16 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Finalmente, se calcula el espesor del cilindro, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico material construcción (acero inoxidable AISI316) (atm)
- E: factor de soldadura (0,85)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{2,16 \cdot 10^5 \cdot 2,285}{0,85 \cdot 2,20 \cdot 10^8 - 0,6 \cdot 2,16 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00414 \text{ m}$$

$$= 4,140 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 11. 1. 13})$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor de cilindro calculado y se suma a este para encontrar el espesor de cilindro final:

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = \overbrace{4,140 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cilindro}} = 4,140 + 0,414 = 4,554 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 5 \text{ mm (Ec. 11. 1. 14)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 5 mm.

- Fondo cónico

En este caso, se calcula el espesor del cono con la misma expresión anterior pero aquí la presión de diseño es la presión atmosférica sobredimensionada 15%:

$$t_{\text{cono}} = \frac{P_{\text{diseño}}^{\text{cono}} \cdot R}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 * P_{\text{diseño}}^{\text{cono}}} + C_1 \text{ (Ec. 11. 1. 48)}$$

$$t_{\text{cono}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 2,285}{2 \cdot 0,85 \cdot 2,20 \cdot 10^8 - 0,2 * 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00292 \text{ m} = 2,924 \text{ mm}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del cabezal calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{cono}}^{\text{final}} = \overbrace{2,924 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cabezal}} \text{ (Ec. 11. 1. 49)}$$

$$t_{\text{cono}}^{\text{final}} = \overbrace{2,924 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cabezal}} = 2,924 + 0,292 = 3,217 \text{ mm} \rightarrow 4 \text{ mm}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 4 mm.

Seguidamente, se calcula el diámetro externo del silo, teniendo en cuenta el espesor de chapa:

$$D_{\text{total}} = D_{\text{silo}} + (2 \cdot t_{\text{cilindro}}) \text{ (Ec. 11. 1. 50)}$$

$$D_{\text{total}} = 4,570 + (2 \cdot 0,005) = 4,580 \text{ m}$$

11.1.6.4.- Peso total equipo almacenamiento

Para poder saber el peso del equipo entero, hay que saber el peso de:

- Peso fondo cónico
- Peso lateral del tanque (parte cilíndrica)
- Peso cabezal superior tanque (cabezal plano)

Y luego añadir el peso de la sustancia almacenada.

- Peso fondo cónico

Primero se calcula el área del fondo cónico:

$$A_{\text{cono}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{silo}}}{2}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{D_{\text{silo}}^2}{4} + h_{\text{cono}}^2\right)^2\right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 11. 1. 51})$$

$$A_{\text{cono}} = \pi \cdot \left(\frac{4,570}{2}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{4,570^2}{4} + 2,285^2\right)^2\right]^{1/2} = 23,197\text{m}^2$$

Se ha encontrado bibliográficamente que la densidad del acero AISI316 es de 7980 Kg/m³. Y ahora ya se puede determinar el peso de esta parte siendo:

$$P_{\text{fondo}} = 23,197 \cdot 0,004 \cdot 7980 = 740,448 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 11. 1. 28})$$

- Peso lateral tanque (parte cilíndrica)

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 4,570 \cdot 6,855 \cdot 0,005 \cdot 7980 = 3926,869 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 11. 1. 29})$$

- Peso cabezal superior

Primero se calcula el volumen de acero del cabezal superior:

$$V_{\text{acero}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{4,570}{2}\right) + 0,004\right)^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{4,570}{2}\right)^3 = 0,131 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 11. 1. 30})$$

Y ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{cabezal}} = 0,131 \cdot 7980 = 1048,999 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 11. 1. 31})$$

- Peso tanque vacío

$$P_{\text{vacío}} = P_{\text{cono}} + P_{\text{cilindro}} + P_{\text{cabezal}} \quad (\text{Ec. 11. 1. 52})$$

$$P_{\text{vacío}} = 740,448 + 3926,869 + 1048,999 = 5716,317 \text{ Kg}$$

Peso tanque en operación (lleno de sólido)

$$P_{\text{operativo}} = P_{\text{vacío}} + (V_{\text{sólido}}^{\text{siló}} \cdot \rho_{\text{sólido}}) \text{ (Ec. 11.1.53)}$$

$$P_{\text{operativo}} = 5716,317 + (81,669 \cdot 1770) = 150269,757 \text{ Kg}$$

11.1.6.5.- Características tanques almacenamiento sulfato de amonio

Para concluir el este punto del diseño de los tanques de ácido sulfúrico se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.7.- Características del silo de sulfato de amonio

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características silo	
Producción diaria	82 m3/día
Días stock	4 días
Temperatura diseño	41 °C
Presión diseño	215943,6 Pa
Volumen silo	125 m3
Diámetro total silo	4,6 M
Altura total silo	9,1 M
% Volumen ocupado	82 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI316
Espesor cilindro	5 Mm
Espesor cabezal semiesférico	4 Mm
Peso silo	
Peso total tanque operativo	150270 Kg

11.1.7.- Almacenamiento del subproducto: Acetonitrilo

11.1.7.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

El acetonitrilo es un subproducto que se obtiene a baja pureza y que se almacena para ser vendido a muy bajo coste. De esta forma se puede desechar sin tener gastos importantes. La forma en que se encuentra el acetonitrilo resultante, es en estado líquido y a temperatura ambiente.

El volumen de acetonitrilo que se produce diariamente es de 26,688 m³/día. Esta sustancia debe cumplir la normativa ITC MIE APQ. 001 ya que es un inflamable y nocivo. Corresponde según esta a la subclase B1.

Para dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de cuatro días (tiempo de stock). Hay que tener en cuenta que el transporte de acetonitrilo, se efectúa por carretera, mediante camiones y por lo tanto se considera un tiempo de residencia suficiente, por si el acetonitrilo no pudiera ser recogido debido a problemas ajenos a la propia planta. Por otra parte, el aumento del tiempo de residencia supondría incrementar el volumen de los tanques de almacenaje, y por lo tanto un problema de espacio en la planta.

El volumen de acetonitrilo que se produce diariamente, es de 26,688 m³/día. Como ya se ha comentado anteriormente, el tiempo de residencia fijado es de 4 días. Por tanto, el volumen de producto a almacenar durante este tiempo es de 106,752 m³. El producto será recogido en camiones cisterna, con una capacidad de 30 m³.

A continuación, se muestra el cálculo del número de camiones necesarios para retirar el subproducto, de la planta.

- Número de camiones diarios:

Para conocer el número de camiones diarios que necesita la planta, se debe conocer el volumen diario de producto producido (almacenamiento de producto) y el volumen del camión cisterna.

$$\text{N}^{\circ} \text{ camiones diarios} = \frac{26,688}{30} = 0,890 \approx 1 \text{ camiones/día (Ec. 11. 1. 1)}$$

Se debe tener en cuenta que en un día laboral los camiones pueden ir a la planta durante 12h (horario de 8h a 20h).

También se debe conocer el volumen de stock que se tendrá:

$$V_{\text{stock}} = 4 \cdot 26,688 = 106,752 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 2)}$$

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento, se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, por los motivos que ya se han explicado al principio.

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 106,752 \cdot (1 + 0,15) = 122,765 \text{ m}^3$$

Ahora se calcula el número de tanques necesarios para almacenar el producto durante 4 días.

- Número de tanques de almacenamiento:

Se escoge un volumen de tanque de 125 m^3 y con el volumen de líquido ya sobredimensionado, se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{122,765}{125} = 0,982 \cong 1 \text{ tanque (Ec. 11. 1. 3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{106,752}{125} = 85,402 \cong 85 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.7.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando un volumen de tanque de 125 m^3 , teniendo en cuenta la relación de altura-diámetro y sabiendo que la proporción de la altura del cabezal semiesférico con el diámetro del tanque es de la mitad, se dimensiona el tanque real cilíndrico.

$$\text{Se conoce que } \begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} \\ h_{\text{cabexal}} = D_{\text{tanque}}/2 \end{cases}$$

El volumen real del tanque es la suma del volumen del cilindro más el volumen de los dos cabezales. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

Sustituyendo esta relación a la ecuación de volumen total del tanque y aislando el diámetro se determina este parámetro:

$$V_{\text{tanque}} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int,tanque}}^2 \cdot 2 \cdot D_{\text{int,tanque}} \right] + \left[\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{int,tanque}}}{2} \right)^3 \right]$$

$$= 180 \xrightarrow{\text{aislando } D} D_{\text{int,tanque}} = 4,086 \text{ m (Ec. 11. 1. 5)}$$

Hace falta remarcar que este tanque de acetonitrilo, está al límite para ser transportado, ya que tiene un diámetro de 4m.

Ahora ya se puede determinar la altura de cono y cilindro:

$$\begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} = 1,5 \cdot 4,086 = 8,172 \text{ m} \\ h_{\text{cabezal}} = D_{\text{tanque}}/2 = 4,086/2 = 2,043 \text{ m} \end{cases}$$

Seguidamente, se calcula el volumen del cabezal del cilindro.

Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

$$V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{4,086}{2} \right)^3 = 17,857 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 6)}$$

El volumen del cilindro será:

$$V_{\text{cilindro}} = 125 - 17,857 = 107,143 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 7)}$$

A continuación, se calcula la altura total del tanque:

$$h_{\text{tanque}} = 8,172 + 2,043 = 10,215 \text{ m (Ec. 11. 1. 8)}$$

11.1.7.3.- Diseño mecánico tanque

El diseño de los tanques de acetonitrilo siguen la normativa ASME y la norma ITC MIE-APQ.001 (almacenamiento de sustancias inflamables y combustibles). Dentro de la normativa ITC MIE-APQ.001 el acetonitrilo está clasificado como un producto de subclase B1.

Para el diseño mecánico hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C:

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11. 1. 9})$$

Como se quiere almacenar a temperatura ambiente, se ha escogido una temperatura de operación de 21°C.

- Material de los tanques

Para la construcción de los tanques de acetonitrilo, se ha escogido el hacer inoxidable AISI304, que según la empresa *Harrington Industrial Plastics*, este tiene una compatibilidad con el acetonitrilo catalogada de excellent.

- Calculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1\text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

• Parte cilíndrica

Primero se calcula la altura de líquido para poder calcular después, la variación de presión.

$$h_{\text{líquido}} = \frac{26,688}{\frac{\pi}{4} \cdot 4,086^2} = 2,035 \text{ m} \quad (\text{Ec. 11. 1. 10})$$

Conociendo la densidad del acetonitrilo, que se encuentra bibliográficamente, y es de 887 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 887 \cdot 9,81 \cdot 2,035 = 17718,738 \text{ Pa} \quad (\text{Ec. 11. 1. 11})$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 17718,738 + 101325 = 1,19 \cdot 10^5 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 12)}$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%

$$P_{\text{diseño}} = 1,19 \cdot 10^5 \text{ Pa} * (1 + 0,15) = 1,37 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Finalmente se calcula el espesor del cilindro, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)
- E: factor de soldadura (0,85)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{1,37 \cdot 10^5 \cdot 2,043}{0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,6 * 1,37 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00315 \text{ m}$$

$$= 3,146 \text{ mm (Ec. 11. 1. 13)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor de cilindro calculado y se suma a este para encontrar el espesor de cilindro final:

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = \overbrace{3,146 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cilindro}} = 3,146 + 0,314 = 3,461 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 4 \text{ mm (Ec. 11. 1. 14)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 4 mm.

- Parte del cabezal superior semiesférico

En este caso, se calcula el espesor del cabezal con la misma expresión anterior pero aquí la presión de diseño es la presión atmosférica sobredimensionada 15%.

$$t_{\text{cabezal}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 2,043}{2 \cdot 0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 * 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00290 \text{ m}$$

$$= 2,901 \text{ mm (Ec. 11. 1. 15)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del cabezal calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{cabezal}}^{\text{final}} = \frac{C_2}{2,901 * 0,10} + t_{\text{cabezal}} = 2,901 + 0,290 = 3,191 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 4 \text{ mm (Ec. 11. 1. 16)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 4mm.

- Fondo inferior

Bibliográficamente, se encuentra que el espesor debe de tener el acero es de 6,5 mm más la tolerancia a la corrosión. Así que el espesor será de 8 mm (t_{fondo}).

11.1.7.4.- Calculo del venteo total para líquidos

El recipiente de almacenamiento debe de disponer de sistemas de venteo para prevenir su deformación. El sistema de venteo debe de tener un diámetro mínimo de 35 mm y siempre igual o superior al tamaño de la tubería que llena o vacía el tanque. Este recipiente de almacenamiento también debe disponer de un dispositivo que permite aligerar un exceso de presión interna.

Primero se calcula la superficie húmeda del tanque:

$$A_{\text{húmeda}} = \pi \cdot 4,086 \cdot 10,215 = 131,115 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 17)}$$

Seguidamente se calcula el calor recibido en caso de fuego externo:

$$Q_{\text{fuego}} = 139,7 \cdot 1 \cdot 131,115 \cdot 0,82 \cdot 10^3 = 7,615 \cdot 10^6 \text{ KJ/h (Ec. 11. 1. 18)}$$

El factor F, que es el factor de reducción sin dimensiones, es igual a la unidad.

Finalmente se calcula la capacidad de venteo:

$$C_{\text{venteo}} = \frac{4,414 \cdot 7,615 \cdot 10^6}{1611,5 \cdot \sqrt{24,594}} = 4205,896 \text{ m}^3/\text{h (Ec. 11. 1. 19)}$$

El valor del calor latente de vaporización se busca en la bibliografía.

11.1.7.5.- Aislamiento

El tanque de almacenamiento de acetonitrilo debe de estar aislado térmicamente mediante lana de roca con un espesor de 50 mm. Este aislante aparte de ser un buen aislante, es incombustible. Se decide escoger la empresa *Isover* para que proporcione este aislante. El aislante escogido es el llamado *Spintex HP-353*.

11.1.7.6.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios.

Según la normativa MIE-APQ-001, todo recipiente que contenga sustancias inflamables y combustibles, tiene la obligación de tener unos cubetos de retención de líquidos por si hay algún tipo de fuga. Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa y el espesor del aislante escogido:

$$D_{\text{total}} = 4,086 + (2 \cdot 0,004) + (2 \cdot 0,05) = 4,194 \text{ m (Ec. 11. 1. 20)}$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 1,5 metro entre tanques. Como la generatriz en este caso supera el 1,75 ya que es de 2, la distancia entre tanques según la normativa será (D la semisuma de generatriz y diámetro):

$$S_{\text{tanques}} = 0,5 \cdot \frac{4,194 + 2}{2} = 1,5 \text{ m (Ec. 11. 1. 21)}$$

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 4,194 + 1,5 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 6,323 \text{ m (Ec. 11. 1. 22)}$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 4,194 + 1,5 + 2 \cdot 2,5 = 14,936 \text{ m (Ec. 11. 1. 23)}$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto. En este caso como todos los tanques son iguales (125 m^3), el volumen mínimo que tiene que almacenar el cubeto es de 125 m^3 .

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$\begin{aligned} A_{\text{ocupada}} &= \left[\left(\frac{1}{2}\right) 4,194 + 1,5 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1\right) \right] \cdot (2 \cdot 4,194 + 1,5) \\ &= 13,142 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 24)} \end{aligned}$$

El área libre es,

$$A_{\text{libre}} = 6,323 \cdot 14,936 - 13,142 = 81,294 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 25)}$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{125}{81,294} = 1,538 \text{ m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar } 15\%} H_{\text{cubeto}} = 1,768 \text{ m (Ec. 11. 1. 26)}$$

11.1.7.7.- Peso total equipo almacenamiento

Para poder saber el peso del equipo entero, hay que saber el peso de:

- Peso cabezal inferior plano
- Peso lateral del tanque (parte cilíndrica)
- Peso cabezal superior tanque

Y luego añadir el peso de la sustancia almacenada.

- Peso cabezal inferior plano

Primero se calcula el área del fondo del cabezal inferior plano:

$$A_{\text{fondo}} = \pi \cdot \left(\frac{4,086}{2}\right)^2 = 13,111\text{m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 27)}$$

Y ahora ya se puede determinar el peso de esta parte siendo:

$$P_{\text{fondo}} = 13,111 \cdot 0,008 \cdot 7800 = 818,157 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 28)}$$

Se consulta bibliográficamente la densidad del acero inoxidable AISI304, y es de 7800 kg/m³.

- Peso lateral tanque (parte cilíndrica)

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 4,086 \cdot 8,172 \cdot 0,004 \cdot 7800 = 3272,628 \text{ Kg (Eq. 11. 1. 29)}$$

- Peso cabezal superior

Primero se calcula el volumen de acero del cabezal superior:

$$V_{\text{acero}} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{4,086}{2}\right) + 0,004\right)^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{4,086}{2}\right)^3 = 0,105 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 30)}$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{cabezal}} = 0,105 \cdot 7800 = 819,760 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 31)}$$

- Peso tanque vacío

$$P_{\text{vacío}} = 818,157 + 3272,628 + 819,760 = 4910,545 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 32)}$$

- Peso tanque en operación (lleno de acetonitrilo)

$$P_{\text{operativo}} = 4910,545 + (26,688 \cdot 887) = 28592,409 \text{ Kg (Ec. 11.1.39)}$$

11.1.7.8.- Especificaciones de los tanques de acetonitrilo

Para concluir el este punto del diseño de los tanques de acetonitrilo se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.8- Características tanques almacenamiento acetonitrilo

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	27 m ³ /día
Días stock	4 días
Temperatura diseño	41 °C
Presión diseño	136900,3 Pa
Volumen tanque cilíndrico	125 m ³
Diámetro total tanque	4,2 M
Altura total tanque	10,2 M
% Volumen ocupado	85 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304
Aislante	Lana de roca de 50 mm de espesor
Espesor cilindro	4 Mm
Espesor cabezal semiesférico	4 Mm
Espesor fondo plano	8 Mm
Capacidad total de venteo	4206 m ³ /h
Dimensiones cubeto retención	
Longitud cubeto	6 M
Altura cubeto	1,8 M
Anchura cubeto	15 M
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	28592 Kg

11.1.8.- Almacenamiento de residuo líquido (purificación HCN)**11.1.8.1.- Conceptos previos a tener en cuenta**

El corriente residual proveniente de la purificación de ácido cianhídrico se almacena ya que se envía tratamiento externo. La sustancia predominante en este corriente es la acrilonitrilo que encuentra en estado líquido. Se almacenará a temperatura ambiente y presión atm.

Esta corriente debe cumplir la normativa ITC MIE APQ. 001. Para dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de 15 días (tiempo de stock). Ya que se espera llenar un camión cisterna de 30 m³ para reducir costes de transporte para la recogida de este.

El volumen de residuo que se produce diariamente es de 1,541 m³/día. Por tanto, el volumen de producto a almacenar durante este tiempo es de 23,108 m³ (V_{stock}). En definitiva, la recogida del residuo se efectuará por carretera, mediante un camión cisterna de 30 m³ cada quince días. Se debe tener en cuenta que en un día laboral los camiones pueden ir a la planta durante 12h (horario de 8h a 20h).

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento, se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, por los motivos que ya se han explicado al principio.

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 23,108 \cdot (1 + 0,15) = 26,575 \text{ m}^3$$

Se escoge un volumen de tanque de 30 m³ y con el volumen de líquido ya sobredimensionado, se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{26,575}{30} = 0,886 \cong 1 \text{ tanque (Ec. 11.1.3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{23,108}{30} = 77,028 \cong 77 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.8.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando un volumen de tanque de 30 m^3 , teniendo en cuenta la relación de altura-diámetro y sabiendo que la proporción de la altura del cabezal semiesférico con el diámetro del tanque es de la mitad, se dimensiona el tanque real cilíndrico.

$$\text{Se conoce que } \begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} \\ h_{\text{cabezal}} = D_{\text{tanque}}/2 \end{cases}$$

El volumen real del tanque es la suma del volumen del cilindro más el volumen de los dos cabezales. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

Sustituyendo esta relación a la ecuación de volumen total del tanque y aislando el diámetro se determina este parámetro:

$$\begin{aligned} V_{\text{tanque}} &= \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int,tanque}}^2 \cdot 2 \cdot D_{\text{int,tanque}} \right] + \left[\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{int,tanque}}}{2} \right)^3 \right] \\ &= 30 \quad \xrightarrow{\text{aislando } D} \quad D_{\text{int,tanque}} = 2,539 \text{ m (Ec. 11. 1. 5)} \end{aligned}$$

Este tanque tiene las dimensiones adecuadas, para que pueda ser transportado por carretera, no supera los 4 m de diámetro.

Ahora ya se puede determinar la altura de cono y cilindro:

$$\begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} = 2 \cdot 2,539 = 5,078 \text{ m} \\ h_{\text{cabezal}} = D_{\text{tanque}}/2 = 2,539/2 = 1,270 \text{ m} \end{cases}$$

Seguidamente, se calcula el volumen del cabezal del cilindro. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

$$V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,539}{2}\right)^3 = 4,286 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 6)}$$

El volumen del cilindro será:

$$V_{\text{cilindro}} = 30 - 4,286 = 25,714 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 7)}$$

A continuación, se calcula la altura total del tanque:

$$h_{\text{tanque}} = 5,078 + 1,270 = 6,348 \text{ m (Ec. 11. 1. 8)}$$

11.1.8.3.- Diseño mecánico tanque

Para el diseño mecánico hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C:

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^\circ\text{C (Ec. 11. 1. 9)}$$

Como se quiere almacenar a temperatura ambiente, se ha escogido una temperatura de operación de 21°C.

- Material de los tanques

Para la construcción del tanque, se ha escogido el acero inoxidable AISI304.

- Cálculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1 \text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

- Parte cilíndrica

Primero se calcula la altura de líquido para poder calcular después, la variación de presión.

$$h_{\text{líquido}} = \frac{3,841}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,539^2} = 0,759 \text{ m (Ec. 11. 1. 10)}$$

Conociendo la densidad del fluido que se encuentra bibliográficamente, y es de 741 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 421 \cdot 9,81 \cdot 0,759 = 3132,146 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 11)}$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 3132,146 + 101325 = 1,04 \cdot 10^5 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 12)}$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%

$$P_{\text{diseño}} = 1,04 \cdot 10^5 * (1 + 0,15) = 1,19 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Finalmente se calcula el espesor del cilindro, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)
- E: factor de soldadura (0,85)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{1,19 \cdot 10^5 \cdot 1,270}{0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,6 * 1,19 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,0024 \text{ m}$$

$$= 2,397 \text{ mm (Ec. 11. 1. 13)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor de cilindro calculado y se suma a este para encontrar el espesor de cilindro final:

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = \overbrace{2,397 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cilindro}} = 2,397 + 0,240 = 2,637 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 3 \text{ mm (Ec. 11. 1. 14)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 3 mm.

- Parte del cabezal superior semiesférico

En este caso, se calcula el espesor del cabezal con la misma expresión anterior pero aquí la presión de diseño es la presión atmosférica sobredimensionada 15%

$$t_{\text{cabezal}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 1,270}{2 \cdot 0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 * 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00237\text{m}$$

$$= 2,371 \text{ mm (Ec. 11.1.15)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del cabezal calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{cabezal}}^{\text{final}} = \overbrace{2,371 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cabezal}} = 2,371 + 0,237 = 2,608 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 3\text{mm (Ec. 11.1.16)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 3 mm.

- Fondo inferior

Bibliográficamente, se encuentra que el espesor debe de tener el acero es de 6,5 mm más la tolerancia a la corrosión. Así que el espesor será de 8 mm (t_{fondo}).

11.1.8.4.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios.

Según la normativa MIE-APQ-001, todo recipiente que contenga sustancias inflamables y combustibles, tiene la obligación de tener unos cubetos de retención de líquidos por

si hay algún tipo de fuga. Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa:

$$D_{\text{total}} = 2,359 + (2 \cdot 0,003) = 2,545 \text{ m (Ec. 11. 1. 20)}$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 1,5 metro entre tanques. Como la generatriz en este caso supera el 1,75 ya que es de 2, la distancia entre tanques según la normativa será (D la semisuma de generatriz y diámetro):

$$S_{\text{tanques}} = 0,5 \cdot \frac{2,545 + 2}{2} = 1,1 \text{ m (Ec. 11. 1. 21)}$$

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 2,545 + 1,1 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 5,704 \text{ m (Ec. 11. 1. 22)}$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 2,545 + 1,1 + 2 \cdot 2,5 = 11,227 \text{ m (Ec. 11. 1. 23)}$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto. En este caso como todos los tanques son iguales (30 m^3), el volumen mínimo que tiene que almacenar el cubeto es de 30 m^3 .

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$A_{\text{ocupada}} = \left[\left(\frac{1}{2} \right) 2,545 + 1,1 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1 \right) \right] \cdot (2 \cdot 2,545 + 1,1) \\ = 4,386 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 24)}$$

El área libre es,

$$A_{\text{libre}} = 5,704 \cdot 11,227 - 4,386 = 59,655 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 25)}$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{30}{59,655} = 0,503 \text{ m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar 15\%}} H_{\text{cubeto}} = 0,578 \text{ m} \text{ (Ec. 11. 1. 26)}$$

11.1.8.5.- Peso total equipo almacenamiento

Para poder saber el peso del equipo entero, hay que saber el peso de:

- Peso cabezal inferior plano
- Peso lateral del tanque (parte cilíndrica)
- Peso cabezal superior tanque

Y luego añadir el peso de la sustancia almacenada.

- Peso cabezal inferior plano

Primero se calcula el área del fondo del cabezal inferior plano:

$$A_{\text{fondo}} = \pi \cdot \left(\frac{2,539}{2} \right)^2 = 5,064 \text{ m}^2 \text{ (Eq. 11. 1. 27)}$$

Y ahora ya se puede determinar el peso de esta parte siendo:

$$P_{\text{fondo}} = 5,064 \cdot 0,008 \cdot 7800 = 315,969 \text{ Kg} \text{ (Eq. 11. 1. 28)}$$

Se consulta bibliográficamente la densidad del acero inoxidable AISI304, y es de 7800 kg/m³.

- Peso lateral tanque (parte cilíndrica)

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 2,539 \cdot 5,078 \cdot 0,003 \cdot 7800 = 947,906 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 29)}$$

- Peso cabezal superior

Primero se calcula el volumen de acero del cabezal superior:

$$V_{\text{acero}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{2,539}{2} \right) + 0,003 \right)^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,539}{2} \right)^3 = 0,030 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 30)}$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{cabezal}} = 0,030 \cdot 7800 = 237,537 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 31)}$$

- Peso tanque vacío

$$P_{\text{vacío}} = 315,969 + 947,906 + 237,537 = 1501,412 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 32)}$$

- Peso tanque en operación (lleno de residuo)

$$P_{\text{operativo}} = 1501,412 + (1,541 \cdot 741) = 2643,524 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 34)}$$

11.1.8.6.- Especificaciones del tanque del residuo

Para concluir el este punto del diseño de los tanques de residuo de HCN, se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.9- Características tanques almacenamiento residuo HCN

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	2 m ³ /día
Días stock	15 días
Temperatura diseño	41 °C
Presión diseño	119068,3 Pa
Volumen tanque cilíndrico	30 m ³
Diámetro total tanque	2,5 m
Altura total tanque	6,3 m
% Volumen ocupado	77 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304
Espesor cilindro	3 mm
Espesor cabezal semiesférico	3 Mm
Espesor fondo plano	8 Mm
Dimensiones cubeto retención	
Longitud cubeto	6 M
Altura cubeto	0,6 M
Anchura cubeto	11 M
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	2644 Kg

11.1.9.- Almacenamiento de residuos: Polímero acrilonitrilo

11.1.9.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

Una parte del acrilonitrilo ha polimerizado. Este polímero es almacenado a temperatura ambiente y a presión atmosférica.

Para dimensionar los tanques se ha fijado un tiempo de residencia en planta de 7 días (tiempo de stock). Ya que se espera llenar un camión cisterna de 30 m³ para reducir costes de transporte para la recogida de este. El volumen de residuo que se produce diariamente es de 3,841 m³/día. Por tanto, el volumen de producto a almacenar durante este tiempo es de 26,886 m³ (V_{stock}).

En definitiva, la recogida del residuo se efectuará por carretera, mediante un camión cisterna de 30 m³ cada 7 días. Se debe tener en cuenta que en un día laboral los camiones pueden ir a la planta durante 12h (horario de 8h a 20h).

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento, se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, por los motivos que ya se han explicado al principio.

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 26,886 \cdot (1 + 0,15) = 30,919 \text{ m}^3$$

Se escoge un volumen de tanque de 30 m³ y con el volumen de polímero ya sobredimensionado, se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{30,919}{30} = 1,013 \cong 1 \text{ tanque (Ec. 11. 1. 3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{26,886}{30} = 89,620 \cong 90 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.9.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando un volumen de tanque de 30 m³, teniendo en cuenta la relación de altura-diámetro y sabiendo que la proporción de la altura del cabezal semiesférico con el diámetro del tanque es de la mitad, se dimensiona el tanque real cilíndrico.

$$\text{Se conoce que } \begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} \\ h_{\text{cabexal}} = D_{\text{tanque}}/2 \end{cases}$$

El volumen real del tanque es la suma del volumen del cilindro más el volumen de los dos cabezales. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

Sustituyendo esta relación a la ecuación de volumen total del tanque y aislando el diámetro se determina este parámetro:

$$V_{\text{tanque}} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int,tanque}}^2 \cdot 2 \cdot D_{\text{int,tanque}} \right] + \left[\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{int,tanque}}}{2} \right)^3 \right]$$

$$= 30 \xrightarrow{\text{aislando D}} D_{\text{int,tanque}} = 2,539 \text{ m (Ec. 11. 1. 5)}$$

Este tanque tiene las dimensiones adecuadas, para que pueda ser transportado por carretera, no supera los 4 m de diámetro.

Ahora ya se puede determinar la altura de cono y cilindro:

$$\begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} = 2 \cdot 2,539 = 5,078 \text{ m} \\ h_{\text{cabezal}} = D_{\text{tanque}}/2 = 2,539/2 = 2,043 \text{ m} \end{cases}$$

Seguidamente, se calcula el volumen del cabezal del cilindro.

Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

$$V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,539}{2} \right)^3 = 4,286 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 6)}$$

El volumen del cilindro será:

$$V_{\text{cilindro}} = 30 - 4,286 = 25,714 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 7)}$$

A continuación, se calcula la altura total del tanque:

$$h_{\text{tanque}} = 5,078 + 1,270 = 6,348 \text{ m (Ec. 11. 1. 8)}$$

11.1.9.3.- Diseño mecánico tanque

Para el diseño mecánico hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C:

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^\circ\text{C (Ec. 11. 1. 9)}$$

Como se quiere almacenar a temperatura ambiente, se ha escogido una temperatura de operación de 21°C.

- Material de los tanques

Para la construcción del tanque, se ha escogido el acero inoxidable AISI304.

- Cálculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1\text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

• Parte cilíndrica

Primero se calcula la altura de líquido para poder calcular después, la variación de presión.

$$h_{\text{líquido}} = \frac{1,541}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,539^2} = 0,304 \text{ m (Ec. 11. 1. 10)}$$

Conociendo la densidad del fluido que se encuentra bibliográficamente, y es de 741 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 741 \cdot 9,81 \cdot 0,304 = 2212,677 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 11)}$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 2212,677 + 101325 = 1,04 \cdot 10^5 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 12)}$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%

$$P_{\text{diseño}} = 1,04 \cdot 10^5 * (1 + 0,15) = 1,20 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Finalmente se calcula el espesor del cilindro, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)

- E: factor de soldadura (0,85)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{1,20 \cdot 10^5 \cdot 1,270}{0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,6 * 1,20 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00239\text{m}$$

$$= 2,390 \text{ mm (Ec. 11. 1. 13)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor de cilindro calculado y se suma a este para encontrar el espesor de cilindro final:

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = \overbrace{2,390 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cilindro}} = 2,390 + 0,239 = 2,629 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 3 \text{ mm (Ec. 11. 1. 14)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 3 mm.

- Parte del cabezal superior semiesférico

En este caso, se calcula el espesor del cabezal con la misma expresión anterior pero aquí la presión de diseño es la presión atmosférica sobredimensionada 15%

$$t_{\text{cabezal}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 1,270}{2 \cdot 0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 * 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00237\text{m}$$

$$= 2,371 \text{ mm (Ec. 11. 1. 15)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del cabezal calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{cabezal}}^{\text{final}} = \overbrace{2,371 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cabezal}} = 2,371 + 0,237 = 2,608 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 3\text{mm (Ec. 11. 1. 16)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 3 mm.

- Fondo inferior

Bibliográficamente, se encuentra que el espesor debe de tener el acero es de 6,5 mm más la tolerancia a la corrosión. Así que el espesor será de 8 mm (t_{fondo}).

11.1.9.4.- Dimensionamiento del cubeto de retención

Los recipientes de superficie para almacenar líquidos inflamables y combustibles deben de disponer de una cubeta de retención. Es importante que cada filera de cubetos tenga al lado una vía de acceso que permite la intervención de la brigada contra incendios.

Según la normativa MIE-APQ-001, todo recipiente que contenga sustancias inflamables y combustibles, tiene la obligación de tener unos cubetos de retención de líquidos por si hay algún tipo de fuga. Estos cubetos, tendrán una pequeña inclinación en la parte inferior, para facilitar la evacuación de los líquidos que contengan.

En primer lugar se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa:

$$D_{\text{total}} = 2,359 + (2 \cdot 0,003) = 2,545 \text{ m (Ec. 11. 1. 20)}$$

- Longitud cubeto

A continuación, se calcula la anchura y longitud del cubeto, la cual ha de guardar unas distancias mínimas de seguridad de 1 metro entre este y la pared del tanque y de 1,5 metro entre tanques. Como la generatriz en este caso supera el 1,75 ya que es de 2, la distancia entre tanques según la normativa será (D la semisuma de generatriz y diámetro):

$$S_{\text{tanques}} = 0,5 \cdot \frac{2,545 + 2}{2} = 1,1 \text{ m (Ec. 11. 1. 21)}$$

La distancia entre la pared del tanque y el cubeto, viene dada bibliográficamente, según la clase de la sustancia almacenada, en este caso se ha escogido una distancia de 2,5 m (S_{cubeto}), siendo el mínimo de 1,5 m.

$$L_{\text{cubeto}} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 2,545 + 1,1 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1\right) + 2 \cdot 2,5 = 5,704 \text{ m (Ec. 11. 1. 22)}$$

- Anchura cubeto

$$W_{\text{cubeto}} = 2 \cdot 2,545 + 1,1 + 2 \cdot 2,5 = 11,227 \text{ m (Ec. 11. 1. 23)}$$

- Altura cubeto

La altura del cubeto viene dada por el volumen que puede retener el cubeto de retención. Según la norma MIE-APQ-001, el volumen que tiene que retener el cubeto es igual al volumen entero del tanque más grande dentro del cubeto. En este caso como todos los tanques son iguales (30 m^3), el volumen mínimo que tiene que almacenar el cubeto es de 30 m^3 .

Para poder calcular la altura del cubeto, hace falta encontrar el área libre de cubeto y este requiere conocer el área ocupada:

$$\begin{aligned} A_{\text{ocupada}} &= \left[\left(\frac{1}{2}\right) 2,545 + 1,1 \cdot \left(\frac{1}{2} - 1\right) \right] \cdot (2 \cdot 2,545 + 1,1) \\ &= 4,386 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 24)} \end{aligned}$$

El área libre es,

$$A_{\text{libre}} = 5,704 \cdot 11,227 - 4,386 = 59,655 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 25)}$$

Ahora sí que se puede calcular la altura del cubeto:

$$H_{\text{cubeto}} = \frac{30}{59,655} = 0,503 \text{ m} \xrightarrow{\text{sobredimensionar 15\%}} H_{\text{cubeto}} = 0,578 \text{ m (Ec. 11. 1. 26)}$$

11.1.9.5.- Peso total equipo almacenamiento

Para poder saber el peso del equipo entero, hay que saber el peso de:

- Peso cabezal inferior plano
- Peso lateral del tanque (parte cilíndrica)
- Peso cabezal superior tanque

Y añadir el peso de la sustancia almacenada.

- Peso cabezal inferior plano

Primero se calcula el área del fondo del cabezal inferior plano:

$$A_{\text{fondo}} = \pi \cdot \left(\frac{2,539}{2}\right)^2 = 5,064 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 27)}$$

Y ahora ya se puede determinar el peso de esta parte siendo:

$$P_{\text{fondo}} = 5,064 \cdot 0,008 \cdot 7800 = 315,969 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 28)}$$

Se consulta bibliográficamente la densidad del acero inoxidable AISI304, y es de 7800 kg/m³.

- Peso lateral tanque (parte cilíndrica)

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 2,539 \cdot 5,078 \cdot 0,003 \cdot 7800 = 947,906 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 29)}$$

- Peso cabezal superior

Primero se calcula el volumen de acero del cabezal superior:

$$V_{\text{acero}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{2,539}{2}\right) + 0,003\right)^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,539}{2}\right)^3 = 0,030 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 30)}$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{cabezal}} = 0,030 \cdot 7800 = 237,537 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 31)}$$

- Peso tanque vacío

$$P_{\text{vacío}} = 315,969 + 947,906 + 237,537 = 1501,421 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 32)}$$

- Peso tanque en operación (lleno de residuo)

$$P_{\text{operativo}} = 1501,421 + (3,841 \cdot 421) = 3118,124 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 34)}$$

11.1.9.6.- Especificaciones del tanque de acrilonitrilo polimerizado

Para concluir el este punto del diseño de los tanques de acrilonitrilo polimerizado, se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.10- Características tanques almacenamiento acrilonitrilo polimerizado

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	3,8 m ³ /día
Días stock	7 días
Temperatura diseño	41 °C
Presión diseño	120125,7 Pa
Volumen tanque cilíndrico	30 m ³
Diámetro total tanque	2,5 m
Altura total tanque	6,3 m
% Volumen ocupado	90 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304
Espesor cilindro	3 mm
Espesor cabezal semiesférico	3 mm
Espesor fondo plano	8 mm
Dimensiones cubeto retención	
Longitud cubeto	6 m
Altura cubeto	0,6 m
Anchura cubeto	11 m
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	3118 Kg

11.1.10.- Almacenamiento de inhibidor: Hidroquinona monometil éter11.1.10.1.- Conceptos previos a tener en cuenta

El inhibidor hidroquinona monometil éter, se utiliza para que el acrilonitrilo no polimerice. Esta sustancia es muy inestable y con la luz pierde sus propiedades. No se puede almacenar más de un año. Se ha decidido comprar un “drum” de 250l que cubre unos 45 días.

El volumen requerido diariamente es de $6,136 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{día}$. Se opta por tener un tiempo de residencia de 35 días. Por tanto, el volumen de producto a almacenar durante este tiempo es de $0,215 \text{ m}^3 (V_{\text{stock}})$.

A la hora de realizar el cálculo del volumen necesario para su almacenamiento, se ha de tener en cuenta que el diseño estará sobredimensionado un 15%, por los motivos que ya se han explicado al principio.

$$V_{\text{stock}}^{\text{sobredimensionado}} = 0,215 \cdot (1 + 0,15) = 0,247 \text{ m}^3$$

Se escoge un volumen de tanque de $0,250 \text{ m}^3$ (250 l) y con el volumen de inhibidor ya sobredimensionado, se calcula el número de tanques:

$$NT = \frac{0,247}{0,250} = 0,988 \cong 1 \text{ tanque (Ec. 11. 1. 3)}$$

Ahora se calcula el porcentaje de volumen ocupado del tanque:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{0,215}{0,250} = 85,901 \cong 86 \text{ (Ec. 11. 1. 4)}$$

11.1.10.2.- Dimensionamiento tanque

Fijando un volumen de tanque de $0,250 \text{ m}^3$, teniendo en cuenta la relación de altura-diámetro y sabiendo que la proporción de la altura del cabezal semiesférico con el diámetro del tanque es de la mitad, se dimensiona el tanque real cilíndrico.

$$\text{Se conoce que } \begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} \\ h_{\text{cabexal}} = D_{\text{tanque}}/2 \end{cases}$$

El volumen real del tanque es la suma del volumen del cilindro más el volumen de los dos cabezales. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

Sustituyendo esta relación a la ecuación de volumen total del tanque y aislando el diámetro se determina este parámetro:

$$\begin{aligned} V_{\text{tanque}} &= \left[\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int,tanque}}^2 \cdot 2 \cdot D_{\text{int,tanque}} \right] + \left[\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{int,tanque}}}{2} \right)^3 \right] \\ &= 30 \quad \xrightarrow{\text{aislando } D} \quad D_{\text{int,tanque}} = 0,515 \text{ m (Ec. 11. 1. 5)} \end{aligned}$$

Este tanque tiene las dimensiones adecuadas, para que pueda ser transportado por carretera, no supera los 4 m de diámetro.

Ahora ya se puede determinar la altura de cono y cilindro:

$$\begin{cases} h_{\text{cilindro}} = 2 \cdot D_{\text{tanque}} = 2 \cdot 0,515 = 1,030 \text{ m} \\ h_{\text{cabezal}} = D_{\text{tanque}}/2 = 0,515/2 = 0,258 \text{ m} \end{cases}$$

Seguidamente, se calcula el volumen del cabezal del cilindro. Se decide que los cabezales inferiores de los tanques serán planos y los superiores semiesféricos.

$$V_{\text{cabezal}}^{\text{semi}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,515}{2} \right)^3 = 0,0358 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 6)}$$

El volumen del cilindro será:

$$V_{\text{cilindro}} = 0,250 - 0,0358 = 0,214 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 7)}$$

A continuación, se calcula la altura total del tanque:

$$h_{\text{tanque}} = 1,030 + 0,258 = 1,288 \text{ m (Ec. 11. 1. 8)}$$

11.1.10.3.- Diseño mecánico tanque

Para el diseño mecánico hace falta tener en cuenta que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C:

$$T_{\text{diseño}} = 21 + 20 = 41^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11. 1. 9})$$

Como se quiere almacenar a temperatura ambiente, se ha escogido una temperatura de operación de 21°C.

- Material de los tanques

Para la construcción del tanque, se ha escogido el acero inoxidable AISI304 ya que según la empresa *Harrington Industrial Plastics*, *este tiene* una compatibilidad con la hidroquinona catalogada *excellent*.

- Cálculo del espesor de los tanques

Para el cálculo de los espesores hace falta conocer el límite elástico, ya que la metodología ASME lo requiere. Sabiendo que el acero inoxidable es el AISI304, se busca bibliográficamente el límite elástico (S) de este a temperatura deseada y tiene el valor de:

$$S = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{mm}^2}{1 \text{m}^2} = 2,00 \cdot 10^8 \text{Pa}$$

• Parte cilíndrica

Primero se calcula la altura de líquido para poder calcular después, la variación de presión.

$$h_{\text{líquido}} = \frac{6,136 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,515^2} = 0,0295 \text{ m} \quad (\text{Ec. 11. 1. 10})$$

Conociendo la densidad del fluido que se encuentra bibliográficamente, y es de 982 kg/m³, se calcula la presión que ejerce el líquido en el tanque.

$$\Delta P = 982 \cdot 9,81 \cdot 0,0295 = 283,694 \text{ Pa} \quad (\text{Ec. 11. 1. 11})$$

Ahora se calcula la presión de diseño:

$$P_{\text{diseño}} = 283,694 + 101325 = 1,02 \cdot 10^5 \text{ Pa (Ec. 11. 1. 12)}$$

Se sobredimensiona esta presión un 15%

$$P_{\text{diseño}} = 1,02 \cdot 10^5 * (1 + 0,15) = 1,17 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Finalmente se calcula el espesor del cilindro, conociendo estos parámetros:

- R: radio interno (mm)
- S: límite elástico (atm)
- E: factor de soldadura (0,85)
- C₁: tolerancia a la corrosión (1,5 mm)
- C₂: tolerancia a la fabricación (mm)

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 0,2575}{0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,6 * 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00168 \text{ m}$$

$$= 1,677 \text{ mm (Ec. 11. 1. 13)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor de cilindro calculado y se suma a este para encontrar el espesor de cilindro final:

$$t_{\text{cilindro}}^{\text{final}} = \overbrace{1,677 * 0,10}^{C_2} + t_{\text{cilindro}} = 1,677 + 0,168 = 1,845 \text{ mm}$$

$$\rightarrow 3 \text{ mm (Ec. 11. 1. 14)}$$

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 3 mm.

- Parte del cabezal superior semiesférico

En este caso, se calcula el espesor del cabezal con la misma expresión anterior pero aquí la presión de diseño es la presión atmosférica sobredimensionada 15%

$$t_{\text{cabezal}} = \frac{1,17 \cdot 10^5 \cdot 0,2575}{2 \cdot 0,85 \cdot 2,00 \cdot 10^8 - 0,2 * 1,17 \cdot 10^5} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,00168 \text{ m}$$

$$= 1,677 \text{ mm (Ec. 11. 1. 15)}$$

Ahora se calcula la tolerancia de fabricación, que es el 10% del espesor del cabezal calculado y se suma a este para encontrar el espesor final:

$$t_{\text{cabezal}}^{\text{final}} = \frac{C_2}{1,677 * 0,10} + t_{\text{cabezal}} = 1,677 + 0,167 = 1,845 \text{ mm}$$

→ 3mm (**Ec. 11. 1. 16**)

Se buscan espesores que sean comerciales por eso se redondea a 3 mm.

- Fondo inferior

Bibliográficamente, se encuentra que el espesor debe de tener el acero es de 6,5 mm más la tolerancia a la corrosión. Así que el espesor será de 8 mm (t_{fondo}).

11.1.10.4.- Aislamiento

El tanque de almacenamiento de hidroquinona debe de estar aislado térmicamente mediante lana de roca con un espesor de 50 mm, ya que es importante que se mantenga la sustancia a una temperatura fresca para que no pierda su poder inhibidor. Este aislante aparte de ser un buen aislante, es incombustible. Se decide escoger la empresa *Isover* para que proporcione este aislante. El aislante escogido es el llamado *Spintex HP-353*.

Se calcula el diámetro total de tanque, teniendo en cuenta el espesor de chapa y el espesor del aislante escogido:

$$D_{\text{total}} = 0,515 + (2 \cdot 0,003) + (2 \cdot 0,05) = 0,621 \text{ m (Ec. 11. 1. 20)}$$

11.1.10.5.- Peso total equipo almacenamiento

Para poder saber el peso del equipo entero, hay que saber el peso de:

- Peso cabezal inferior plano
- Peso lateral del tanque (parte cilíndrica)
- Peso cabezal superior tanque

Y luego añadir el peso de la sustancia almacenada.

- Peso cabezal inferior plano

Primero se calcula el área del fondo del cabezal inferior plano:

$$A_{\text{fondo}} = \pi \cdot \left(\frac{0,515}{2}\right)^2 = 0,208 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 11. 1. 27)}$$

Y ahora ya se puede determinar el peso de esta parte siendo:

$$P_{\text{fondo}} = 0,208 \cdot 0,008 \cdot 7800 = 12,998 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 28)}$$

Se consulta bibliográficamente la densidad del acero inoxidable AISI304, y es de 7800 kg/m³.

- Peso lateral tanque (parte cilíndrica)

$$P_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 0,515 \cdot 1,030 \cdot 0,003 \cdot 7800 = 38,995 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 29)}$$

- Peso cabezal superior

Primero se calcula el volumen de acero del cabezal superior:

$$\begin{aligned} V_{\text{acero}} &= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{0,515}{2}\right) + 0,003\right)^3 - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,515}{2}\right)^3 \\ &= 1,264 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ (Ec. 11. 1. 30)} \end{aligned}$$

Y ahora ya se puede calcular el peso de este siendo:

$$P_{\text{cabezal}} = 1,264 \cdot 10^{-3} \cdot 7800 = 9,863 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 31)}$$

- Peso tanque vacío

$$P_{\text{vacío}} = 12,998 + 38,995 + 9,863 = 61,856 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 32)}$$

- Peso tanque en operación (lleno de residuo)

$$P_{\text{operativo}} = 61,856 + (0,00614 \cdot 982) = 67,880 \text{ Kg (Ec. 11. 1. 34)}$$

11.1.10.6.- Especificaciones del tanque de inhibidor: Hidroquinona monometil éter

Para concluir el este punto del diseño del tanque de inhibidor, se adjunta en forma de tabla, las características más relevantes de estos, determinadas en anterioridad:

Tabla 11.1.11- Características tanque almacenamiento inhibidor: Hidroquinona monometil éter

ESPECIFICACIONES DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Características tanque	
Producción diaria	6,14E-03 m ³ /día
Días stock	35 días
Temperatura diseño	41 °C
Presión diseño	116850 Pa
Volumen tanque cilíndrico	0,250 m ³
Diámetro total tanque	0,6 M
Altura total tanque	1,3 M
% Volumen ocupado	86 %
Material de diseño	Acero inoxidable AISI304
Aislante	Lana de roca de 50mm de espesor
Espesor cilindro	3 Mm
Espesor cabezal semiesférico	3 Mm
Espesor fondo plano	8 Mm
Peso tanque	
Peso total tanque operativo	68 Kg

11.2.- COLUMNAS

Para el diseño de las columnas se han utilizado dos software informáticos especializados en procesos químicos como son Aspen Hysys y Aspen Plus. Debido a la simplicidad de uso en primera instancia se decidió usar Hysys pero posteriormente debido a limitaciones de este programa con las columnas con equilibrios azeotrópicos se optó por cambiar a Aspen Plus. Con el objetivo de tener junto todo el proceso en un solo archivo para la optimización de los corrientes residuales, reaprovechamiento energético y recirculaciones, se utilizó lo previamente calculado en Aspen Hysys para dimensionar de manera rápida los equipos en Aspen Plus, así pues, hecha esta

pequeña aclaración del porqué utilizar dos software parecidos para un mismo fin, se procede a la explicación detallada del cálculo de las columnas de separación del proceso:

11.2.1.- Columna de absorción (CA-302)

El objetivo de esta columna de absorción es eliminar del corriente principal de proceso los gases residuales generados en el reactor, así como el nitrógeno introducido en el sistema en la entrada del proceso con la adición de oxígeno. Para ello se usa este equipo en el que se absorbe una corriente de agua refrigerada, recirculada del proceso para maximizar la separación evitando al máximo la disolución de dichos gases en este corriente de agua. El cuadro de caracterización de los corrientes es el siguiente:

Tabla 11.2.1- Especificaciones de los corrientes de la columna CA-302

Nombre	304	805	306	307
Temperatura (°C)	20,0	2,0	2,8	15,5
Presión (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013
Fracción de vapor	1,000	0,000	1,000	0,000
Caudal molar (kmol/h)	2223,619	8200,000	1998,742	8424,878
Caudal másico (kg/h)	66537,712	147730,869	57553,698	156714,883
Caudal volumétrico (m3/h)	53392,465	145,428	45221,667	160,221
Densidad (kg/m3)	1,246	1015,835	1,273	978,117
Entalpía (Gcal/h)	-4,136	-562,528	-8,326	-558,338
FRACCIÓN MÁSCICA				
N2	0,751		0,862	0,002
O2	0,026		0,030	242ppm
C3H6	0,026		0,025	0,002
C3H4O=ACR	27ppm		515ppb	11ppm
C3H3N=AN	0,090	6ppb	0,002	0,038
C2H3N=ACN	0,004	67ppm	25ppm	0,002
HCN	0,018	748ppb	316ppb	0,007
CO2	0,044		0,047	0,001
CO	0,026		0,030	107ppm
H2O	0,014	1,000	0,005	0,947
CAUDAL MOLAR (kmol/h)				
N2	1784,750		1771,961	12,789
O2	54,378		53,191	1,187
C3H6	41,854		33,628	8,226
C3H4O=ACR	0,032		0,001	0,032

C3H3N=AN	113,404	<0.001	1,837	111,567
C2H3N=ACN	7,069	0,240	0,035	7,275
HCN	43,378	0,004	0,001	43,381
CO2	65,821		61,203	4,618
CO	62,643		62,046	0,597
H2O	50,289	8199,756	14,839	8,235

Y este es su esquema:

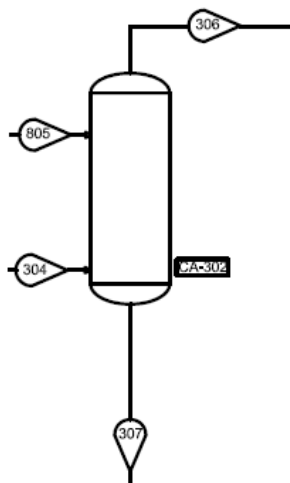


Figura 11. 2.1.- Esquema Columna CA-302

Para dimensionar la columna se han utilizado los softwares Aspen Hysys y Aspen Plus. Con el Aspen Hysys se hizo un primer diseño sencillo en el cual estimar el cabal de agua mínimo y un número de etapas de equilibrio óptimo. Esto se hace usando la herramienta Adjust, la cual usamos para minimizar el valor del caudal de agua a añadir para obtener una total recuperación de los componentes orgánicos del proceso, siendo los claves el acrilonitrilo y el ácido cianhídrico, uno por ser el producto principal del proceso, el otro por ser un subproducto de valor además de muy contaminante y por tanto, con un límite muy restrictivo de emisión.

El esquema usado pues es el siguiente:

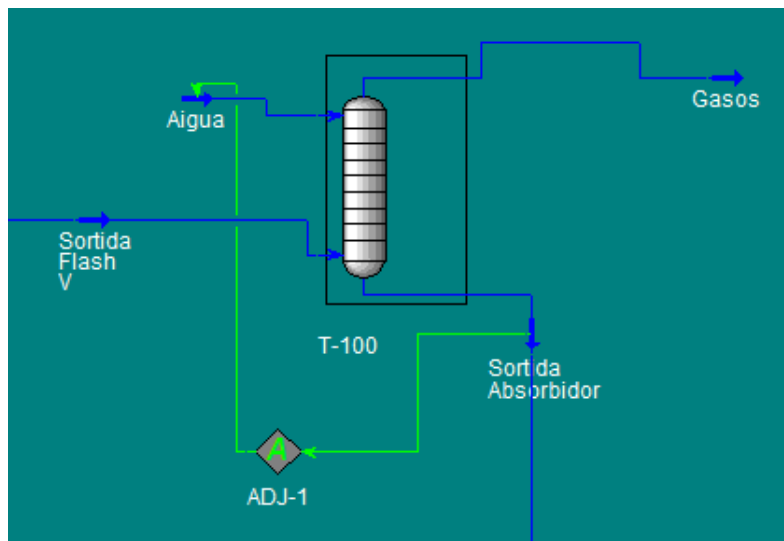


Figura 11.1.2- Esquema de cálculo con Aspen Hysys para minimizar el uso de agua en la absorción.

Una vez se tiene el caudal necesario y el número de etapas pasamos a hacer el diseño exhaustivo de la columna en Aspen Plus:

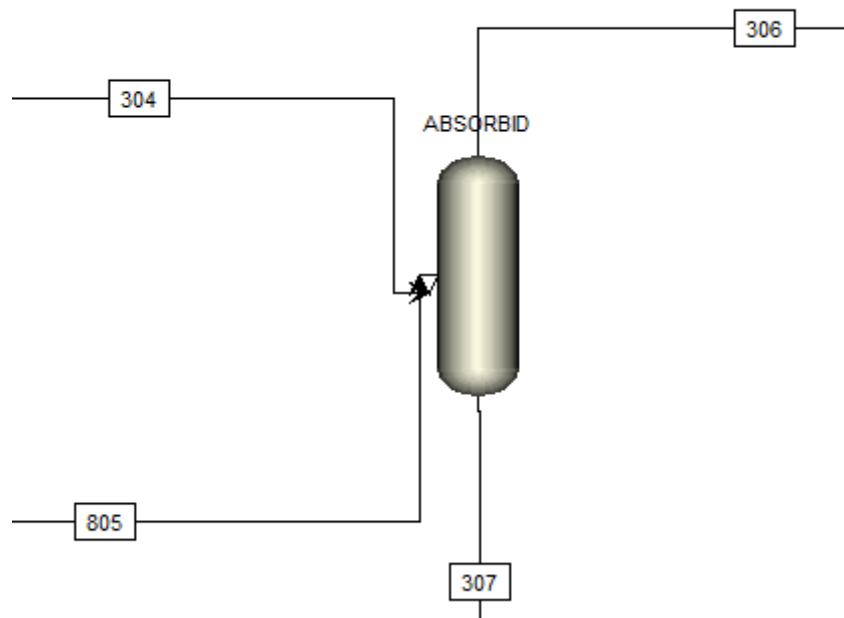


Figura 11.2.3- Esquema de cálculo con Aspen Plus para el diseño riguroso de la columna CA-302.

Del simulador Hysys se ha obtenido en total y posteriormente introducido en Aspen Plus:

- Presión de trabajo óptima.
- Número de etapas teóricas.
- Caudal de disolvente y su caracterización.
- Diámetro aproximado.

11.2.1.1.-Selección del tipo de columna:

El primer paso es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos. Se estudian los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía (Wankat, 2007).

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

En la primera estimación hecha con Hysys se obtiene:

Tabla 11.2.2- Resultado estimación previa de Aspen Hysys:

N etapas	10
Caudal de disolvente (Kg/h)	150.000
Presión de trabajo (bar)	1

Teniendo los primeros valores, se procede a calcular un diámetro aproximado para la columna:

$$Q = v \cdot A \quad (\text{Ec. 11.2.1})$$

Dónde:

V= velocidad superficial del líquido, (m/s).

A= Sección transversal del absorbedor, (m²).

Debido a pérdidas de carga y dificultades en la circulación del fluido, 0,1 m/s es la velocidad de circulación de un líquido a través de una columna, se puede estimar el diámetro quedando como:

$$A = 0.25 \pi \phi^2 \quad (\text{Ec. 11.2.2})$$

El diámetro estimado es: $\phi \approx 0.752 \text{ m}$

Por la tanto se selecciona una columna de relleno.

11.2.1.2.- Selección del tipo de flujo en la columna:

En una operación de absorción, se puede operar co-corriente o contracorriente. El objetivo de una operación u otra reside en maximizar la transferencia de materia entre fases minimizando los costes. Sin necesidad de hacer calculo alguno, siguiendo los consejos de Wankat (2007) y del propio software Aspen Plus, se decide operar contracorriente. El corriente 304 entra justo encima del primer plato teórico y el corriente 805 por debajo del último.

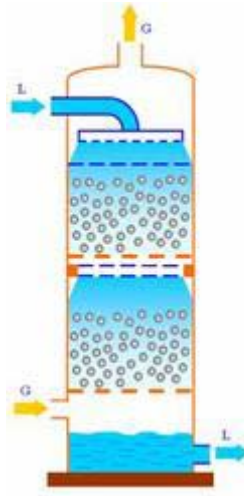


Figura 11. 2.4.- Esquema de circulación del líquido por la columna con un solo paso por plato de fluido.

11.2.1.3.- Selección del tipo de relleno

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro preestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.



Figura 11. 2.5.- Ejemplo de empaque ordenado.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados.

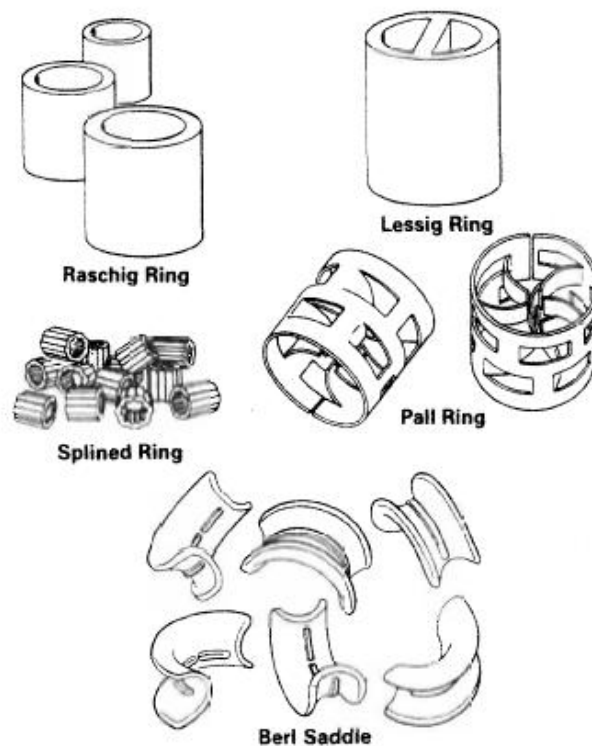


Figura 11. 2.6.- Ejemplos de empaque aleatorio.

Se elige el relleno (ordenado): Sulzer Mellapak 125 X.



Figura 11. 2.2.- Flexirings (Glitsch)-Inox.

Cuando usemos aleatorio, usaremos los flexirings de la figura 11.7.

11.2.1.4.- Resultados de la columna:

Para obtener el diámetro de la columna se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007). Se calcula usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados como se observa en las siguientes figuras, teniendo esta columna a modo de ejemplo para las siguientes.

Navigation: << All >> [Icons]

Configuration | Streams | Pressure | Condenser | Thermosiphon Config. | Reboiler | 3-Phase

Setup options

Calculation type: Equilibrium

Number of stages: 12 [Stage wizard]

Condenser: None

Reboiler: None

Valid phases: Vapor-Liquid

Convergence: Standard

Operating specifications

[Input fields]

Free water reflux ratio: [Input field] [Feed basis]

Figura 11. 2.3.- Pantalla donde se fijan las etapas de equilibrio.

Navigation: [Icons] All [Icons]

Specifications | Design | Pdrop | Stichmair | Results | Profiles

Packing section

Starting stage: 2 Ending stage: 11 Type: INTX

Packing characteristics

Vendor: GENERIC Dimension: 2-IN OR 50-MM

Material: METAL Packing factor: 52 1/m [Update parameters]

Packed height

Height equivalent to a theoretical plate (HETP): 0,4 meter

Section packed height: [Input field] meter

Figura 11. 2.4.- Pantalla donde se fija el tipo, material y dimensiones del relleno, así como la altura teórica entre platos.

✓ Specifications			Design	Pdrop	Stichlmair	Results	Profiles
Packed column sizing results							
▶ Section starting stage:	2						
Section ending stage:	11						
Column diameter:	3,39296555	meter					
Maximum fractional capacity:	0,62						
Maximum capacity factor:	0,08730892	m/sec					
Section pressure drop:	0,02478413	bar					
Average pressure drop / Height:	63,1819498	mm-water/m					
Maximum stage liquid holdup:	0,04805436	cum					
Max liquid superficial velocity:	0,00055203	m/sec					
Surface area:	1,18	sqcm/cc					
Void fraction:	0,79						
1st Stichlmair constant:	0,101306						
2nd Stichlmair constant:	0,143736						
3rd Stichlmair constant:	1,60751						

Figura 11. 2.5.- Resultados sobre el relleno e hidrodinámica.

TPFQ							Compositions	K-Values	Hydraulics	Reactions	Efficiencies	
View: Summary							Basis: Mass					
Profiles												
Stage	Temperature	Pressure	Heat duty	Liquid from	Vapor from							
	C	bar	Gcal/hr	kg/hr	kg/hr							
1	70,1301653	1,01325	0	17938,4941	85425,9996							
2	70,8893803	1,01325	0	17955,6616	86607,7613							
3	70,9067014	1,01325	0	17955,9398	86624,9288							
4	70,9071786	1,01325	0	17955,9445	86625,2071							
5	70,9071944	1,01325	0	17955,9446	86625,2118							
6	70,907195	1,01325	0	17955,9446	86625,2119							
7	70,907195	1,01325	0	17955,9446	86625,2118							
8	70,907195	1,01325	0	17955,9446	86625,2118							
9	70,9071951	1,01325	0	17955,9442	86625,2118							
10	70,9072034	1,01325	0	17955,8253	86625,2114							
11	70,9097067	1,01325	0	17919,8693	86625,0925							
12	71,6667101	1,01325	0	11449,3789	86589,1365							

Figura 11. 2.6.- Resultados sobre los caudales que circulan a lo largo de la columna.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máxicos a lo largo de la columna se aplican las siguientes ecuaciones:

$$Abscisas = \frac{L_{líq}}{G_{gas}} \sqrt{\frac{\rho_{gas}}{\rho_{líq}}} \quad (\text{Ec. 11.2.3})$$

Dónde: $L_{líq} = \text{Lb de líquido} / \text{s} \cdot \text{ft}^2$

$$G_{gas} = \text{Lb de gas} / \text{s} \cdot \text{ft}^2$$

$$\rho_{líq} = \text{Lb de líquido} / \text{ft}^3$$

$$\rho_{gas} = \text{Lb de gas} / \text{ft}^3$$

Usando la figura siguiente, se estima el valor de la ordenada teniendo el valor de la pérdida de carga relativa la altura de los datos calculados con Aspen:

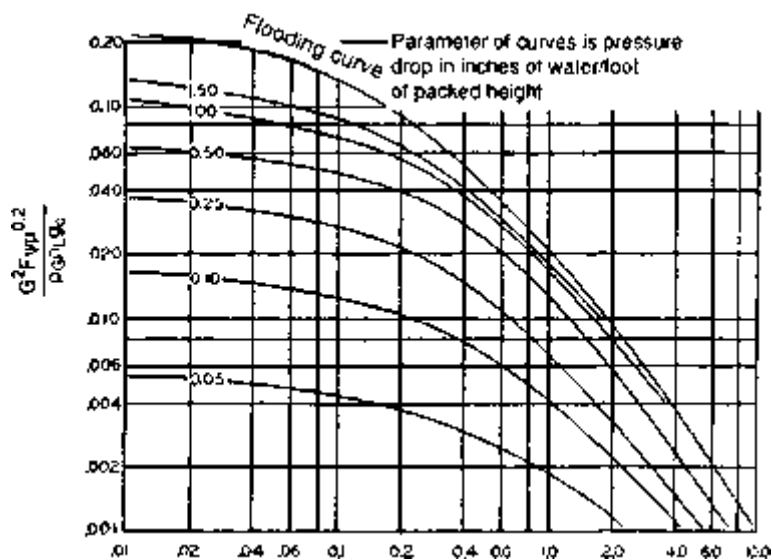


Figura 11.2.7.- Diagrama de Eckert.

Dónde: $F =$ Factor de relleno (70 para Mellapak, 50 para Glisch)

$\mu =$ viscosidad del líquido (cP)

$$\Psi = \frac{\rho_{agua}}{\rho_{liq.}}$$

$$\rho_{gas} = \text{Lb de gas} / \text{ft}^3$$

Así pues, sabiendo el caudal másico y su valor relativo a la sección, se obtiene el valor de esta:

$$Area = \frac{\text{Caudal masico} \left(\frac{\text{lb}}{\text{s}}\right)}{G_{Gas}} \quad (\text{Ec. 11.2.4})$$

Y de la ecuación (Ec. 11.2.2) se obtiene su diámetro. Así pues, presentamos el total de estos valores:

Tabla 11.2.3.- Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus y el cálculo del diámetro:

Diámetro (m)	0,839
Número de etapas	20
HETP (m)	0,6
Presión de diseño (bar)	1
ΔP por sección (mBar/m)	0,913
ΔP total (bar)	0,0110

Siendo pues el diámetro similar al estimado, se comprueba que la selección del tipo de relleno en la columna es correcta.

11.2.1.5.- Diseño mecánico de la columna

A. Cálculo del espesor de la pared de la columna de absorción

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S). (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 71,7 °C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_P = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11.2.5})$$

$$T_P = T_{operación} + 20^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 11.2.6})$$

P_P : Presión de proyecto (Pa).

T_P : Temperatura de proyecto (Pa).

El material elegido para la carcasa del reactor es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_P \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_P} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

D_i : Diámetro interior (mm).

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.4.- Datos del espesor de la pared de la columna:

P proyecto (Pa)	111000
Dint (mm)	839
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
t (mm)	0,508

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

espesor de la pared cilíndrica = 3mm

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja. El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

R_i : Radio interior de la columna (mm).

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2\text{mm}) \quad (\text{Ec. 11.2.10})$$

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

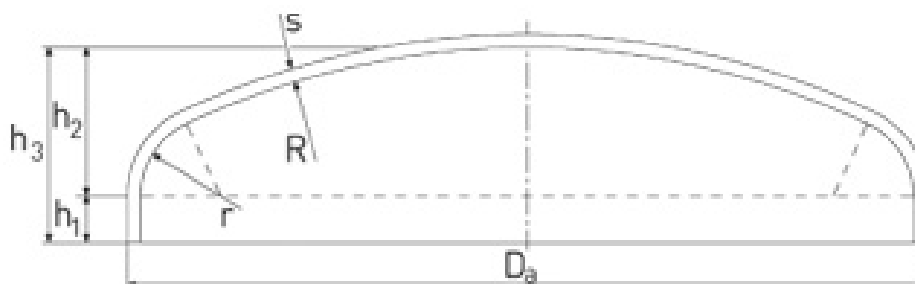


Figura 11. 2.13.-Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11.2.11})$$

h_3 , altura del cabezal (mm).

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11. 2.5.- Datos obtenidos para el cabezal toriesférico:

R(mm)	845
r(mm)	84,5
h1(mm)	10,5
h2(mm)	162,142
h3(mm)	172,642

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11.2.12})$$

$$V_i = 0,0596 \text{ m}^3$$

$$V_e = 0,0605 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,0009 \text{ m}^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$\text{Presión}_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.2.13})$$

$$\text{Presión}_{fondo} = 245600 \text{ Pa}$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.6.- Datos para el cabezal del fondo de la columna:

t (mm)	4
Da (mm)	847
h3(mm)	176,074
Vpared (m³)	0,001

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$Altura_{total} = L + A_{cabezal} + A_{fondo} + 2 \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor...) En este caso se suman 2 metros.

$$Altura_{total} = 12 + 0,172 + 0,176 + 2$$

$$Altura_{total} = 14,349 \text{ m}$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$Area_{lateral} = 37,165 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

$$Peso_{columna\ vacio}$$

$$= Peso_{de\ la\ carcasa\ lateral} + Peso_{cabezal}$$

$$+ Peso_{fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times espesor \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal y fondo} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna vacia} = 906,807 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de fluido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{icabezal} + V_{ifondo} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$Peso \text{ del agua} = 7852,147 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del liquido} = 7687,208 \text{ kg}$$

$$Peso_{columna llena} =$$

$$Peso \text{ de la columna vacia} + Peso \text{ liquido} + peso_{del relleno} \quad (\text{Ec. 11.2.20})$$

$$peso_{del relleno} = 663,430 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ de la columna llena agua} = 9422,384 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ de la columna llena liquido} = 9257,445 \text{ kg}$$

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol.

El aislamiento elegido son mantas aislantes de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior del quench se coge la de diseño. Para la temperatura de aislamiento deseada

se ponen 45°C, una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de 0,5 m/s. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda.

Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.14 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.7.

Figura 11.2.14.-Datos seleccionados para obtener el espesor del aislante.

Tabla 11.2.7.- Espesores recomendados para el aislante:

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	46,83	12,7	78,19
Superficie plana vertical	49,88	12,7	75,03
Superficie plana horizontal Cara abajo	55,46	12,7	69,88

A continuación se muestra una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11.2.8.- Características físicas principales de la columna CA-302:

Presión de diseño (Pa)	111500
Temperatura de diseño (°C)	15,5
Distancia entre platos (m)	0,6
Número de platos	20
Altura de lecho empacado (m)	12
Altura total (m)	14,349
Espesor de cabezales (mm)	3 y 4
Espesor del aislante (mm)	12,7
Peso total columna vacía (kg)	906,807
Peso columna en operación (kg)	9257,445
Peso columna con agua (kg)	9422,384
Diámetro del lecho(m)	0,839
Diámetro total columna (m)	0,845

11.2.1.6.- Equipos internos de la columna

Los equipos internos de esta columna se escogen de las recomendaciones que hace el catálogo de relleno estructurado de la empresa Sulzer.

- Relleno de la columna

Los tipos de relleno de la columna y los motivos por los que se escoge, están explicados anteriormente. El relleno utilizado es el Mellapak 125 X de la empresa Sulzer.



Figura 11.2.15.-Relleno seleccionado para esta columna (Mellapak 125 X de la empresa Sulzer).

- Distribuidor de líquido

Los tipos de distribuidores de líquido se explican en la columna Quench CA-301. Para esta torre se escoge un distribuidor tipo depresión (*Trough Distributors, NTD*), por su diámetro y caudal específico de líquido estándar. El distribuidor seleccionado es el VKGF de la empresa Sulzer. Este se coloca en la parte superior de la columna.

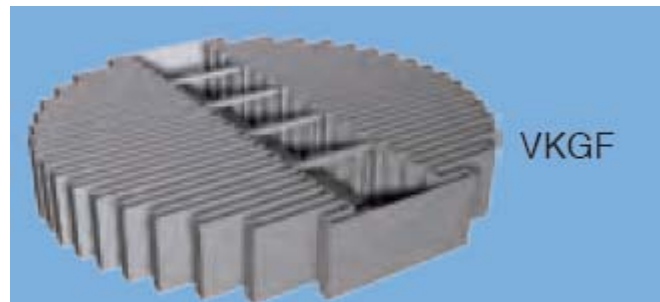


Figura 11. 2.16.- Distribuidor VKGF de la empresa Sulzer.

- Redistribución

En este caso en lugar de usar un redistribuidor, se utiliza un colector y un distribuidor para la redistribución del líquido después de una sección de lecho. Para el relleno Mellapak cada 6 m es recomendable hacer redistribuición.

El colector escogido es el SLT, ya que aparte de ser un colector también es un soporte de relleno. Este colector se suele utilizar dónde el espacio, entre las secciones del lecho de relleno, es limitado. Este colector requiere un anillo de soporte dentro de la columna.



Figura 11.2. 17.- Colector de líquidos SLT de la empresa Sulzer.

El distribuidor utilizado es el mismo que en la parte superior de la torre.

La altura de relleno son 12 metros por lo que habría que poner después de una sección de 6 metros un colector y distribuidor.

- Soporte de relleno

En esta torre el soporte de relleno sólo se utiliza en la parte inferior de la columna ya bajo las secciones intermedias se utiliza el colector anterior que actúa también de soporte.

El soporte seleccionado es el tipo contracorriente, la explicación de los soportes de relleno está en la columna Quench CA-301. El soporte utilizado es el TEB/TSB de la empresa Sulzer, que se utiliza para rellenos estructurados. Ambos requieren anillos de soporte soldados a la pared de la columna.



Figura 11.2. 18.- Soporte de relleno TEB/TSB de la empresa Sulzer.

- Entrada de gas

En las columnas con relleno estructurado, se debe producir una distribución de la corriente gaseosa en su ingreso al equipo, contrariamente a los casos de los rellenos al azar, donde es norma general no distribuir la fase gas. El sistema de entrada de gases es tan importante como la elección del relleno para conseguir un buen rendimiento de la columna.

Dado el tamaño de la columna el sistema de entrada de gas elegido es el GIV de la empresa Sulzer.



Figura 11.2.19.- Sistema de entrada de gas GIV de la empresa Sulzer.

- Colocación de los equipos internos de la columna

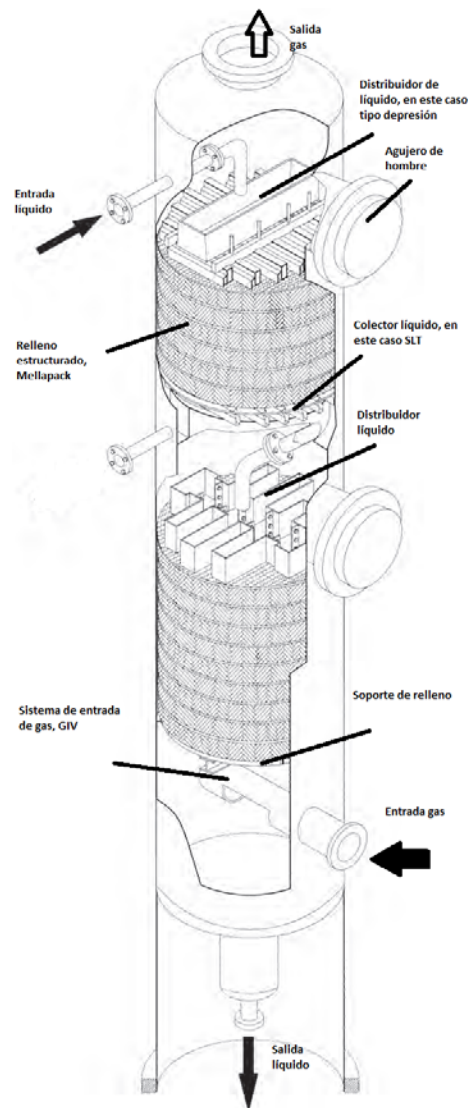


Figura 11.2.20.- Imagen del interior de la columna con relleno Mellapak.

11.2.2.- Columna de rectificación extractiva (CD-301)

El objetivo de esta columna es separar del corriente principal de proceso el acrilonitrilo del acetonitrilo, ya limpio de amoníaco gracias a la unidad de quenching, y sin la mayor parte de los gases de no interés separados en la unidad de absorción.

Debido a que el acrilonitrilo y el acetonitrilo forman un heteroazeótropo y homoazeótropo con agua respectivamente (como nos comentan los autores Dimian & Sorin, 2008 (bibliografía)), con una operación simple de rectificación no conseguiremos separar los dos compuestos así pues debemos usar algún método de separación avanzado. El recomendado por los mismos autores consiste en realizar una operación de rectificación extractiva, usando como disolvente sencillamente agua, ya que ésta es capaz de con cantidades de disolvente aproximadas de 10:1 con el flujo de orgánicos, disolver el acetonitrilo sin hacer lo mismo con el acrilonitrilo, y hecho esto, separar el agua con el soluto de el resto de componentes volátiles en una rectificación. Además, para maximizar la recuperación de producto, se requiere trabajar a vacío, así pues, trabajaremos a vacío en las posteriores columnas ya que en la mayoría de ellas, también se requiere de esta condición en la operación y se estima económicamente desfavorable y de complejidad de operación mayor la compresión y descompresión en cada columna.

El diseño de este equipo se realiza con el software Aspen Plus ya que tiene mayor capacidad de resolución numérica de columnas con mezclas azeotrópicas que otros softwares de la misma familia.

El esquema de esta columna y la caracterización de sus corrientes son:

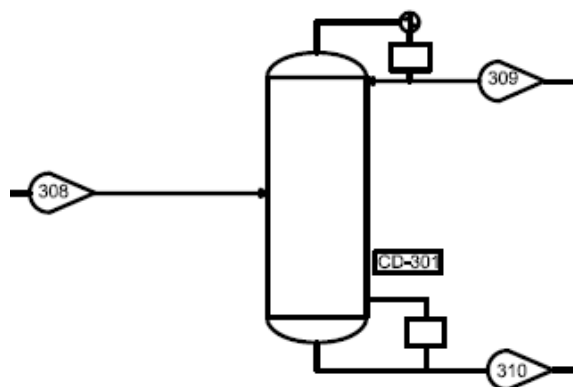


Figura 11.2.21.-Esquema de la columna CD-301.

Tabla 11.2.9.- Especificaciones de los corrientes de la columna CD-301:

Nombre	308	309	310
Temperatura (°C)	16,000	40,6	74,100
Presión (bar)	1,013	0,400	0,400
Fracción de vapor	0,0	1,0	0,0
Caudal molar (kmol/h)	9358,207	252,207	9106,0
Caudal másico (kg/h)	174143,496	9826,957	164316,539
Caudal volumétrico (m3/h)	178,523	15212,048	174,353
Densidad (kg/m3)	975,468	0,615	942,436
Entalpía (Gcal/h)	-619,243	4,204	-612,723
FRACCIÓN MÁSCICA			
N2	0,002	0,040	
O2	240ppm	0,004	
C3H6	0,002	0,039	
C3H4O=ACR	11ppm	197ppm	
C3H3N=AN	0,037	0,654	336ppm
C2H3N=ACN	0,002	16ppm	0,003
HCN	0,009	0,159	18ppm
CO2	0,001	0,023	
CO	105ppm	0,002	
H2O	0,945	0,079	0,997
CAUDAL MOLAR (kmol/h)			
N2	14,061	14,061	
O2	1,304	1,304	
C3H6	9,032	9,032	
C3H4O=ACR	0,034	0,034	
C3H3N=AN	122,153	121,112	1,041
C2H3N=ACN	10,071	0,004	10,067
HCN	58,060	57,950	0,110
CO2	5,090	5,090	
CO	62,643	0,656	
H2O	50,289	42,964	9094,782

En este caso, el diseño se realizó íntegramente con Aspen Plus ya que la opción de realizar un método de Short-Cut con Hysys no era viable al tratarse de un tipo de columna avanzado, como es la rectificación extractiva.

11.2.2.1.-Selección del tipo de columna

Lo primero a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía: Wankat, 2007:

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

En este caso, aún no disponemos de datos propios, pero si los de la bibliografía (Dimian & Sorin, 2008) y en su caso, con caudales similares a los nuestros, para este tipo de columna requieren de columnas de grandes dimensiones, pero recomiendan las columnas empacadas, así pues, seguimos el consejo del autor y se harán de este tipo.

11.2.2.2.- Selección del tipo de flujo en la columna:

En una operación de rectificación extractiva, se pueden obtener diferentes tipos de circulación, por su simplicidad y economía, a la par que por ser el más usado se usará el mismo tipo que en el de la columna CA-302. (Ver figura 11.2.4 para el modelo de flujo)

11.2.2.3.- Selección del tipo de relleno

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro preestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (uniforme): Sulzer Mellapak 125 X .

11.2.2.4.- Resultados de la columna

Para obtener el diámetro de la columna, se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007) usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados análogamente a lo realizado en la columna CA-302 visto en las figuras 11.2.8, 11.2.9, 11.2.10 y 11.2.11.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máximos a lo largo de la columna se aplican las ecuaciones (Ec.11.2.2), (Ec.11.2.3) y (Ec.11.2.4) con la figura 11.2.12 y se obtiene:

Tabla 11. 2.10.-Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus:

Diámetro (m)	1,750
Número de etapas	48
HETP (m)	0,5
Presión de diseño (bar)	0,4
ΔP por sección (mBar/m)	0,577
ΔP total (bar)	0,0111
Relación de reflujo (L/D)	6

11.2.2.5.- Diseño mecánico de la columna

A. Cálculo del espesor de la pared de la columna extractiva

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_P y T_P), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 95 °C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_P = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11. 2. 5})$$

$$T_P = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11. 2. 6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.11.-Datos del espesor de la pared de la columna:

P proyecto (Pa)	110000
Dint (mm)	1750
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
e (mm)	1,047

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 4 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.10})$$

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 4 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

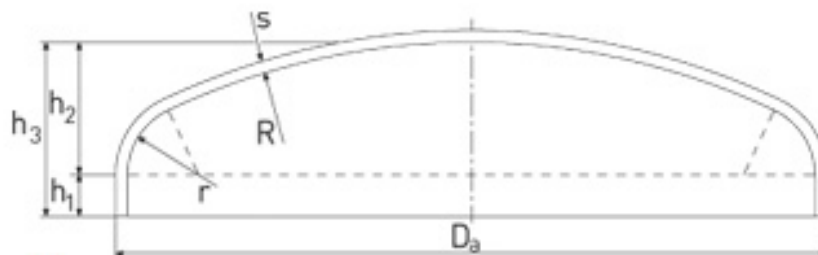


Figura 11.2.22.-Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11.2.11})$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.12.-Datos obtenidos para el cabezal:

R(mm)	1758
r(mm)	175,8
h1(mm)	14
h2(mm)	338,353
h3(mm)	352,353

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11.2.12})$$

$$V_i = 0,259 \text{ m}^3$$

$$V_e = 0,262 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,003 \text{ m}^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$\text{Presión}_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.2.13})$$

$$\text{Presión}_{fondo} = 288900 \text{ Pa}$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.13.-Datos obtenidos para el cabezal del fondo:

t (mm)	5
Da (mm)	1760
h3(mm)	355,785
Vpared (m³)	0,003

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$\text{Altura total} = L + A \text{ cabezal} + A \text{ fondo} + 2 \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor...)En este caso se suman 2 metros.

$$Altura_{total} = 19,2 + 0,352 + 0,355 + 2$$

$$Altura_{total} = 21,908 \text{ m}$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$Area_{lateral} = 117,086 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacio

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times \text{espesor} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal \text{ y fondo}} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna \text{ vacia}} = 3784,798 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de extractiva llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de fluido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i \text{ cabezal}} + V_{i \text{ fondo}} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$\text{Peso del agua} = 50217,676 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del fluido} = 48991,595 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del relleno} = 4618,141 \text{ kg}$$

$$\text{Peso}_{\text{columna llena}} =$$

$$\text{Peso de la columna vacía} + \text{Peso fluido} + \text{peso del relleno} \text{ (Ec. 11. 2. 20)}$$

$$\text{Peso de la columna llena agua} = 58620,615 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena líquido} = 57394,534 \text{ kg}$$

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol.

El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior de la columna extractiva se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C , una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de $0,5 \text{ m/s}$. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda. Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.23 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.14.

Figura 11.2.23.-Datos escogidos para el aislante.

Tabla 11.2.14.-Espesores recomendados para el aislante:

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	48,03	12,7	78,08
Superficie plana vertical	51,32	12,7	74,83
Superficie plana horizontal Cara abajo	57,42	12,7	69,37

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11. 2.15.-- Características físicas principales de la columna CD-301:

Presión de diseño (Pa)	110000
Temperatura de diseño (°C)	75,2
Distancia entre platos (m)	0,5
Número de etapas	12
Altura de lecho empacado (m)	19,2
Altura total (m)	21,908
Espesor de cabezales (mm)	4 y 5
Espesor del aislante (mm)	12,7
Peso total columna vacía (kg)	3784,798
Peso columna en operación (kg)	57394,534
Peso columna con agua (kg)	58620,615
Diámetro del lecho (m)	1,75
Diámetro total columna (m)	1,758
Entrada óptima (nº plato)	30

11.2.2.6.- Equipos internos de la columna

Los equipos internos de esta columna se escogen de las recomendaciones que hace el catálogo de relleno estructurado de la empresa Sulzer.

Y para este tipo de relleno, Mellapak, se explican más detalladamente los equipos internos en la torre de absorción CA-302.

❖ **Relleno de la columna**

Los tipos de relleno de la columna y los motivos por los que se escoge, están explicados anteriormente. El relleno utilizado es el Mellapak 125 X de la empresa Sulzer.

❖ **Distribuidor de líquido**

Para esta torre se escoge un distribuidor tipo depresión (*Trough Distributors, NTD*), por su diámetro y caudal específico de líquido estándar. El distribuidor seleccionado es el VKGF de la empresa Sulzer. Este se coloca en la parte superior de la columna.

❖ Redistribución

En este caso en lugar de usar un redistribuidor, se utiliza un colector y un distribuidor para la redistribución del líquido después de una sección de lecho. El colector escogido es el SLT, ya que aparte de ser un colector también es un soporte de relleno. El distribuidor utilizado es el mismo que en la parte superior de la torre. Como para un relleno Mellapack es recomendable hacer redistribución de líquido cada 6 metros, en este caso que la altura de relleno es de 19,2 m, habría que poner dos colectores y distribuidores a lo largo de la columna a parte del distribuidor inicial en la parte alta de la torre.

❖ Soporte de relleno

En esta torre el soporte de relleno sólo se utiliza en la parte inferior de la columna ya bajo las secciones intermedias se utiliza el colector anterior que actúa también de soporte. El soporte utilizado es el TEB/TSB de la empresa Sulzer, que se utiliza para rellenos estructurados.

❖ Entrada de gas

En las columnas con relleno estructurado, se debe producir una distribución de la corriente gaseosa en su ingreso al equipo, contrariamente a los casos de los rellenos al azar, donde es norma general no distribuir la fase gas. Dado el tamaño de la columna el sistema de entrada de gas elegido es el GIV de la empresa Sulzer.

11.2.3.- Columnas de rectificación

11.2.3.1.- Columna de rectificación (CD-302)

La columna de rectificación CD-302 tiene como fin separar fundamentalmente el ácido cianhídrico del acrilonitrilo, pero además, separa también los gases parcialmente disueltos en el corriente principal en el absorbedor, gases como CO, CO₂, O₂ y N₂.

La caracterización de los corrientes de la columna es:

Tabla 11.2.16.- Especificaciones de los corrientes de la columna CD-302:

Nombre	311	312	313
Temperatura (°C)	31,000	-1,500	46,600
Presión (bar)	0,400	0,400	0,400
Fracción de vapor	0,443	1,000	0,000
Caudal molar (kmol/h)	252,207	89,000	163,207
Caudal másico (kg/h)	9826,957	2669,342	7157,615
Caudal volumétrico (m ³ /h)	7015,718	4991,219	9,357
Densidad (kg/m ³)	1,401	0,535	764,948
Entalpía (Gcal/h)	3,127	1,425	1,504
FRACCIÓN MÁSICA			
N ₂	0,040	0,148	
O ₂	0,004	0,016	
C ₃ H ₆	0,039	0,142	
C ₃ H ₄ O=ACR	197ppm	724ppm	37ppb
C ₃ H ₃ N=AN	0,654	0,016	0,892
C ₂ H ₃ N=ACN	16ppm	322ppb	22ppm
HCN	0,159	0,587	14ppb
CO ₂	0,023	0,084	
CO	0,002	0,007	
H ₂ O	0,079	598ppm	0,108
CAUDAL MOLAR (kmol/h)			
N ₂	14,061	14,068	
O ₂	1,304	1,304	
C ₃ H ₆	9,032	9,032	
C ₃ H ₄ O=ACR	0,034	0,034	
C ₃ H ₃ N=AN	121,112	0,784	120,328
C ₂ H ₃ N=ACN	0,004	2,09E-05	0,004
HCN	57,950	57,050	0,858
CO ₂	5,090	5,090	
CO	0,656	0,656	
H ₂ O	42,964	0,089	42,875

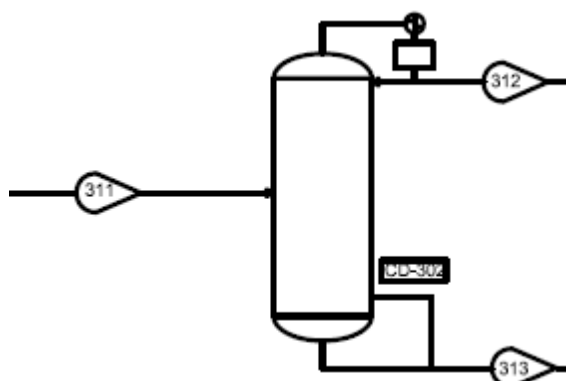


Figura 11.2.24.- Esquema de la columna CD-302.

Para la columna CD-302 se hizo en primera instancia un diseño con el método de Short cut con Hysys indicando cuales eran las fracciones molares de salida deseadas tanto por cabezas como por colas de la columna, la presión de operación y una relación de reflujo aproximada, obteniéndose:

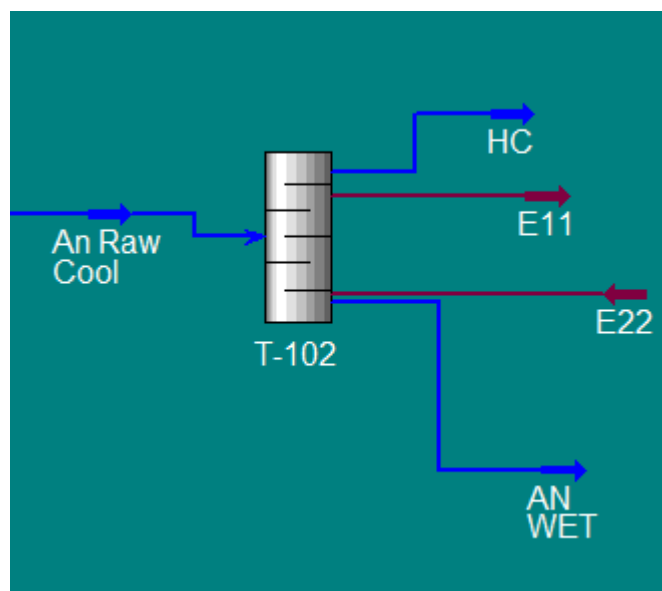


Figura 11.2.25.- Esquema de cálculo en Aspen Hysys con el método de Short cut.

Tabla 11.2.17.- Resultados del método de Short cut obtenidos con Aspen Hysys:

Número de etapas teórico aprox.	8
Relación de reflujo mínima	0,584
Entrada óptima (nº de plato)	3

SELECCIÓN DEL TIPO DE COLUMNA:

Lo primero a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía: Wankat, 2007:

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.

- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

De nuevo nos basaremos en los datos de la bibliografía (Dimian & Sorin, 2008) y siguen requiriendo columnas de relleno debido a los caudales a tratar.

SELECCIÓN DEL TIPO DE FLUJO EN LA COLUMNA:

En una operación de rectificación se pueden obtener diferentes tipos de circulación, por su simplicidad y economía, a la par que por ser el más usado se usará el mismo tipo que en el de la columna CA-302. (Ver figura 11.2.4 para el modelo de flujo)

SELECCIÓN DEL TIPO DE RELLENO:

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios. Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro preestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (aleatorio): Flexirings (Glitsch)-Inox 2''.

RESULTADOS DE LA COLUMNA:

Para obtener el diámetro de la columna, se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007) usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados análogamente a lo realizado en la columna CA-302 visto en las figuras 11.2.8, 11.2.9, 11.2.10 y 11.2.11.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máxicos a lo largo de la columna se aplican las ecuaciones (Ec.11.2.2), (Ec.11.2.3) y (Ec.11.2.4) con la figura 11.2.12 y se obtiene:

Tabla 11.2.18.-Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus:

Diámetro (m)	0,327
Número de etapas	35
HETP (m)	0,2
Presión de diseño (bar)	0,4
ΔP por sección (mBar/m)	2,751
ΔP total (bar)	0,0193
Relación de reflujo (L/D)	3

DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA:**A. Cálculo del espesor de la pared de la columna**

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 66,62C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_p = P_{operación} \times 1,1 \text{ (Ec. 11.2.5)}$$

$$T_p = T_{operación} + 20^{\circ}C \text{ (Ec. 11.2.6)}$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \text{ (Ec. 11.2.7)}$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.19.-Datos del espesor de las paredes:

P proyecto (Pa)	110000
Dint (mm)	327
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
e (mm)	0,196

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11.2.8)}$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente formula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \text{ (Ec. 11.2.9)}$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$\text{espesor del cabezal (t)} = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

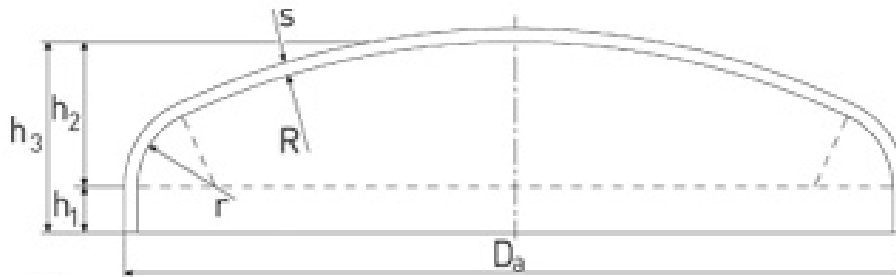


Figura 11.2.26.- Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11. 2. 11})$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.20.-Datos obtenidos para el cabezal:

R(mm)	333
r(mm)	33,3
h1(mm)	10,5
h2(mm)	63,071
h3(mm)	73,571

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11.2.12})$$

$$V_i = 0,0091 m^3$$

$$V_e = 0,0094 m^3$$

$$V_{pared} = 0,0003 m^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$\text{Presión}_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.2.13})$$

$$\text{Presión}_{fondo} = 177500 Pa$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.21,-Datos obtenidos para el cabezal del fondo:

t (mm)	3
Da (mm)	333
h3(mm)	73,570
Vpared (m³)	0,0003

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$\text{Altura}_{total} = L + A_{cabezal} + A_{fondo} + 2 \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor, introducción del relleno aleatorio...) En este caso se suman 2 metros.

$$\text{Altura}_{total} = 7 + 0,073 + 0,073$$

$$\text{Altura}_{total} = 12,747 m$$

$$\text{Area}_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$\text{Area}_{lateral} = 9,415 m^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacío

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo (Ec. 11.2.16)}$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times espesor \times \rho_{acero} \text{ (Ec. 11.2.17)}$$

$$Peso_{cabezal y fondo} = V_{pared} \times \rho_{acero} \text{ (Ec. 11.2.18)}$$

$$Peso_{columna vacía} = 231,044 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de líquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i\text{cabezal}} + V_{i\text{fondo}} \right) \times \rho_{liq} \text{ (Ec. 11.2.19)}$$

$$Peso \text{ del agua} = 773,248 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del líquido} = 592,025 \text{ kg}$$

$$Peso_{columna llena} =$$

$$Peso \text{ de la columna vacía} + Peso \text{ líquido} + peso_{del relleno} \text{ (Ec. 11.2.20)}$$

$$Peso \text{ del relleno} = 1773,131 \text{ kg}$$

Peso de la columna llena agua = 2777,423 kg

Peso de la columna llena liquido = 2596,200 kg

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior del quench se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C , una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de $0,5 \text{ m/s}$. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda.

Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.27 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.22.

Cálculo de Espesor Óptimo - Pérdida de Calor - Equipos [1]

CALORCOL
LANA MINERAL DE ROCA

Mantas Aislantes de 140 kg/m^3

Datos de Entrada

Temperatura Interior:	66.62	°C
Temperatura Superficie Aislamiento:	45	°C
Temperatura Ambiente:	25	°C
Velocidad del Aire:	0.5	m/s
Superficie Exterior Aislamiento:	7	Emisividad: 0.13
Superficie Desnuda:	2	Emisividad: 0.3

Botones: Calcular, Cancelar, Graficar

Figura 11.2.27.- Datos elegidos para el aislante.

Tabla 11.2.22.-Espesores recomendados para el aislante:

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	37,5	12,7	80,29
Superficie plana vertical	38,63	12,7	78,6
Superficie plana horizontal Cara abajo	39,59	12,7	77,99

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11.2.23.- Características físicas principales de la columna CD-302:

Presión de diseño (Pa)	40000
Temperatura de diseño (°C)	53,794
HETP (m)	0,2
Número de etapas	35
Altura de lecho empacado (m)	7
Altura total (m)	9,147
Espesor de cabezales (mm)	3
Espesor del aislante (mm)	12,7
Peso total columna vacía (kg)	231,044
Peso columna en operación (kg)	2596,2
Peso columna con agua (kg)	2777,423
Diámetro del lecho (m)	0,327
Diámetro total columna (m)	0,333
Entrada óptima (nº plato)	5

INTERIOR DE LA COLUMNA:

Los equipos del interior de la columna para rellenos Flexiring, como los de esta torre, son explicados en la columna Quench CA-301.

❖ Relleno de la columna

Anteriormente ya fue explicado, que tipo de relleno se seleccionó y los motivos. Los rellenos utilizados para esta columna de absorción son los Flexiring de la empresa Koch-glitsch, de material acero inoxidable y con unas dimensiones de 2 in.

❖ Distribuidor de líquido

El tipo de distribuidor seleccionado es el distribuidor tipo PAN. Como el material que usamos es acero inoxidable el diámetro mínimo de orificio recomendado es 0,1875 in. Como el tamaño del relleno usado es 2 in que es un tamaño medio, el número de puntos de goteo por ft² (Drip Points/ft²) es de 6-8. El distribuidor elegido es el de la empresa rvt Process Equipment.

❖ Soporte de rellenos

Dado el tamaño de la columna y para un buen aguante del relleno y distribución de gas y líquido, el soporte que se selecciona es el soporte de relleno con pasajes de flujo separados líquido y gas. El soporte elegido es el TS804 Random Packing gas-injection support de la empresa Koch-glitsch.

❖ Redistribuidor

El redistribuidor seleccionado es el de tipo Hold-down Grids, y como esta torre es de 7 m de lecho, se pone un distribuidor en la parte superior de la torre y bajo 3 m de lecho se pone un redistribuidor.

❖ Entrada gas

El gas entra por la parte inferior de la columna, no necesita distribuidor, simplemente una placa colocada por el interior de la columna para impedir que el líquido al caer perturbe la entrada de gas.

11.2.3.2.- Columna de rectificación (CD-601)

La columna de rectificación CD-601 es la segunda columna en complejidad del proceso. El objetivo de este equipo es separar el agua del acrilonitrilo para obtenerlo a la salida de esta con la sequedad necesaria según los requerimientos de especificación de producto y esto se ve complicado con que estos dos compuestos forman un heteroazeótropo. Siguiendo los consejos para este tipo de separación del autor experto Wankat, 2007 (bibliografía), se ha procedido al diseño de una columna de rectificación con un condensador total el cual va seguido de un acumulador de fases

donde se nos separan las dos fases del azeótropo quedando en una de las fases agua en su mayoría, y en la otra la composición del azeótropo. En este acumulador pues, extraemos la fase acuosa la cual ya podremos proceder a tratar y la fase con composición de azeótropo la recirculamos a la entrada de la columna. Por colas de la columna se obtiene acrilonitrilo casi puro, tal y como necesitamos.

Estos son los esquemas de la columna y la especificación de los corrientes:

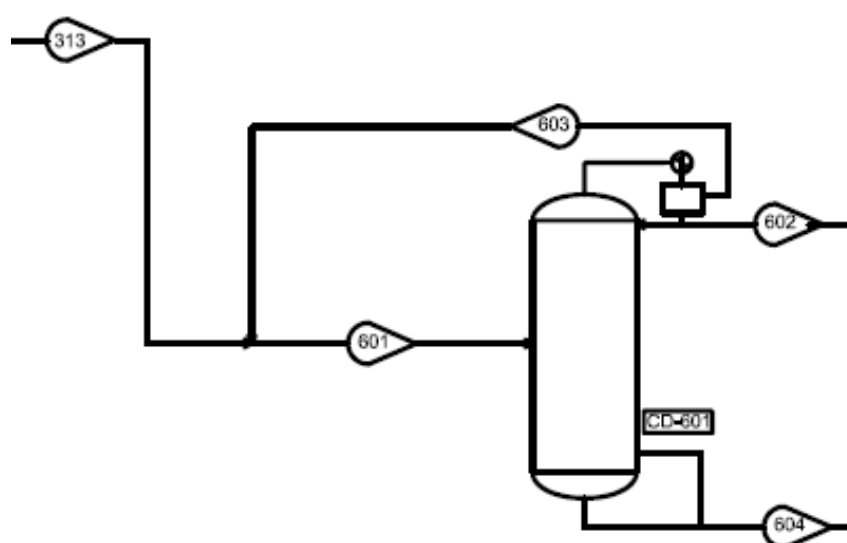


Figura 11.2.28.- Esquema de la columna CD-601.

Tabla 11.2.24.- Caracterización de los corrientes de la columna CD-601.

Nombre	313	602	604
Temperatura (°C)	46,600	46,700	49,800
Presión (bar)	0,400	0,400	0,400
Fracción de vapor	0,000	0,000	0,000
Caudal molar (kmol/h)	163,207	43,207	120,000
Caudal másico (kg/h)	7157,615	822,679	6334,708
Caudal volumétrico (m3/h)	9,357	0,877	8,213
Densidad (kg/m3)	764,948	938,060	771,303
Entalpía (Gcal/h)	1,504	-2,798	4,287
FRACCIÓN MÁSICA			
C3H4O=ACR	37ppb	1ppm	
C3H3N=AN	0,892	0,082	0,997
C2H3N=ACN	22ppm		25ppm
HCN	14ppb	77ppb	

H2O	0,108	0,918	0,003
CAUDAL MOLAR (kmol/h)			
C3H4O=ACR	4,9559E-4	4,9559E-4	
C3H3N=AN	120,328	1,266	119,058
C2H3N=ACN	0,004		0,004
HCN	0,858	0,858	
H2O	42,875	41,936	0,937

Así pues, el problema a la hora de querer empezar el pre cálculo para empezar el diseño reside en la determinación correcta del equilibrio acrilonitrilo-agua ya que los parámetros de equilibrio estimados por los modelos (Estamos trabajando con el paquete UNIQUAC-RK), distan bastante de los experimentales encontrados en la bibliografía:

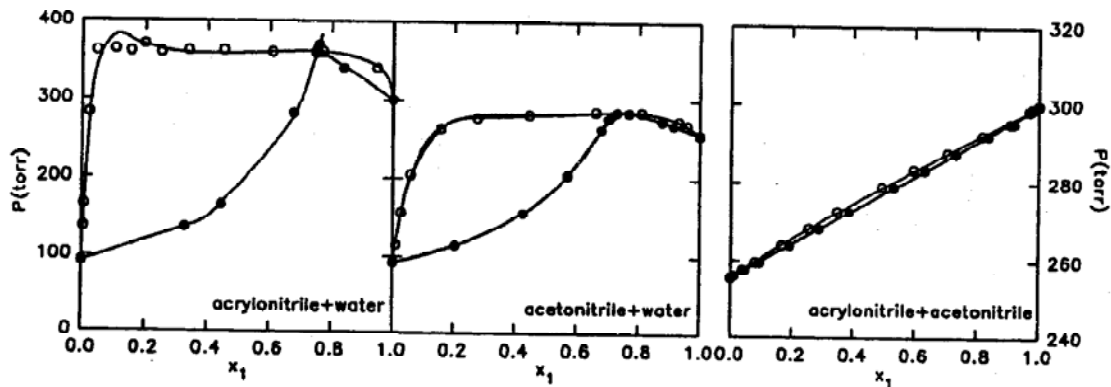


Figura 11.2.29.- Equilibrios extraídos de la *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*.

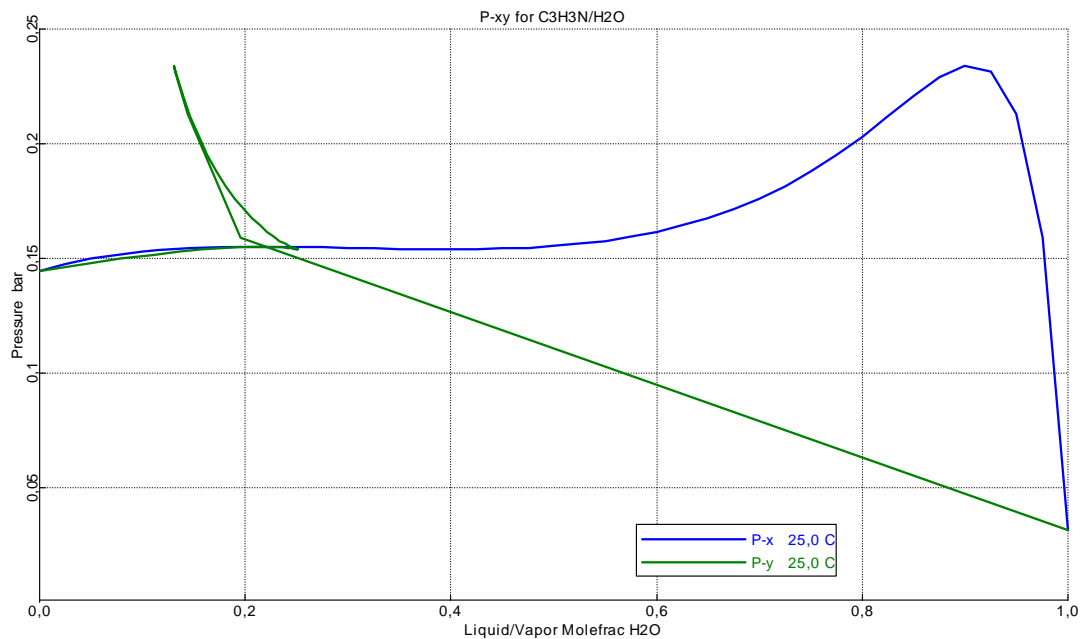


Figura 11. 2.30.- Equilibrios extraídos de Aspen Plus con el modelo UNIQUAC-RK.

Así vemos, que mientras los dos predicen el azeótropo en la misma composición, la forma variopinta predicha por el modelo del software dificulta mucho el cálculo de esta columna ya que pequeños cambios numéricos provocan grandes cambios del equilibrio y así se complica mucho el cálculo. Por tanto, debemos usar los métodos numéricos más avanzados del programa para poder resolver la columna.

Además, al no tener ningún dato previo, se debe empezar el cálculo realizando un pequeño balance de materia para poder determinar la cantidad extraída por colas de la columna. Así pues, para determinar esta cantidad debemos fijar como aproximación que todo el acrilonitrilo que entra en el sistema saldrá por colas, y el resto, saldrá por arriba, así el programa fijará por sí solo las eficacias debido al equilibrio y será el usuario el que deberá cambiar el número de etapas y la relación de reflujo de manera manual hasta hallar los valores óptimos.

Así pues, empezaremos con los valores:

$$\text{Flujo molar de Acrilonitrilo} \approx \text{Bottoms rate} \approx 120,5 \text{ kmol/h} \quad (\text{Ec. 11. 2. 21})$$

Tabla 11.2.25.- Datos iniciales para el diseño riguroso de la columna CD-601:

Bottoms rate (kmol/h)	120,5
Número de etapas	50
Presión de operación (bar)	0,4
Relación de reflujo	10

11.2.3.2.1.-Selección del tipo de columna

Lo primero a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía: Wankat, 2007:

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

De nuevo nos basaremos en los datos de la bibliografía (Dimian & Sorin, 2008) y siguen requiriendo columnas de relleno debido a los elevados caudales a tratar.

11.2.3.2.2.- Selección del tipo de flujo en la columna

En una operación de rectificación se pueden obtener diferentes tipos de circulación, por su simplicidad y economía, a la par que por ser el más usado se usará el mismo tipo que en el de la columna CA-302. (Ver figura 11.4 para el modelo de flujo)

11.2.3.2.3.- Selección del tipo de relleno

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro preestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (uniforme): Sulzer Mellapak 125 X .

11.2.3.2.4.- Resultados de la columna

Para obtener el diámetro de la columna, se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007) usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados análogamente a lo realizado en la columna CA-302 visto en las figuras 11.8, 11.9, 11.10 y 11.11.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máximos a lo largo de la columna se aplican las ecuaciones (Ec.11.2.2), (Ec.11.2.3) y (Ec.11.2.4) con la figura 11.12 y se obtiene:

Tabla 11.2.26.- Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus:

Diámetro (m)	1,608
Número de etapas	19
HETP (m)	0,4
Presión de diseño (bar)	0,4
ΔP por sección (mBar/m)	0,601
ΔP total (bar)	0,00697
Relación de reflujo (L/D)	1,5

11.2.3.2.5.- Diseño mecánico de la columna

A. Cálculo del espesor de la pared de la columna

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_P y T_P), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 49,78°C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_P = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11.2.5})$$

$$T_P = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11.2.6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.27.- Datos del espesor de la pared:

P proyecto (Pa)	110000
Dint (mm)	1115
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
e (mm)	0,667

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.10})$$

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

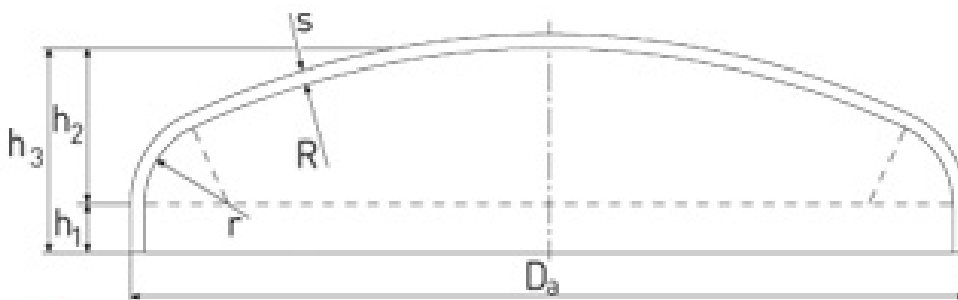


Figura 11. 2.31.- Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11.2.11})$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.28.-Datos obtenidos para el cabezal:

R(mm)	1121,000
r(mm)	112,100
h1(mm)	10,500
h2(mm)	215,549
h3(mm)	226,049

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \text{ (Ec. 11. 2. 12)}$$

$$V_i = 0,105 \text{ m}^3$$

$$V_e = 0,106 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,001 \text{ m}^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$Presión_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \text{ (Ec. 11. 2. 13)}$$

$$Presión_{fondo} = 212800 \text{ Pa}$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesferico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.29.-Datos obtenidos para el fondo:

t (mm)	4
Da (mm)	1123
h3(mm)	229,4805
Vpared (m^3)	0,002

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$Altura\ total = L + A\ cabezal + A\ fondo + 2 \text{ (Ec. 11. 2. 14)}$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor...) En este caso se suman 2 metros.

$$Altura_{total} = 11,6 + 0,226 + 0,226 + 2$$

$$Altura_{total} = 14,056 \text{ m}$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$Area_{lateral} = 47,895 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacio

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times \text{espesor} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal \text{ y fondo}} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna \text{ vacia}} = 1169,243 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de liquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_i \text{cabezal} + V_i \text{fondo} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$Peso \text{ del agua} = 13477,794 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del liquido} = 13194,685 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del relleno} = 2355,700 \text{ kg}$$

$$\text{Peso}_{\text{columna llena}} =$$

$$\text{Peso de la columna vacía} + \text{Peso líquido} + \text{peso del relleno} \quad (\text{Ec. 11.2.20})$$

$$\text{Peso de la columna llena agua} = 15779,692 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena líquido} = 15496,583 \text{ kg}$$

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol.

El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior del quench se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C , una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de $0,5 \text{ m/s}$. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda.

Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.32 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.30.

Figura 11. 2.32.- Datos seleccionados para el aislante.

Tabla 11.2.30.-Espesores recomendados de aislante:

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	38,72	12,7	79,81
Superficie plana vertical	40,11	12,7	77,81
Superficie plana horizontal Cara abajo	41,7	12,7	76,28

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11.2.31.- Características físicas principales de la columna CD-601:

Presión de diseño (Pa)	40000
Temperatura de diseño (°C)	49,78
HETP (m)	0,4
Número de etapas	19
Altura de lecho empacado (m)	11,6
Altura total (m)	14,056
Espesor de cabezales (mm)	3 y 4
Espesor del aislante (mm)	12,7
Peso total columna vacía (kg)	1169,243
Peso columna en operación (kg)	15496,583
Peso columna con agua (kg)	15779,692
Diámetro del lecho (m)	1,115
Diámetro total columna (m)	1,121
Entrada óptima (nº plato)	20

EQUIPOS INTERNOS DE LA COLUMNA:

Los equipos internos de esta columna se escogen de las recomendaciones que hace el catálogo de relleno estructurado de la empresa Sulzer.

Y para este tipo de relleno, Mellapak, se explican más detalladamente los equipos internos en la torre de absorción CA-302.

❖ **Relleno de la columna**

Los tipos de relleno de la columna y los motivos por los que se escoge, están explicados anteriormente. El relleno utilizado es el Mellapak 125 X de la empresa Sulzer.

❖ **Distribuidor de líquido**

Para esta torre se escoge un distribuidor tipo depresión (*Trough Distributors, NTD*), por su diámetro y caudal específico de líquido estándar. El distribuidor seleccionado es el VKGF de la empresa Sulzer. Este se coloca en la parte superior de la columna.

❖ Redistribución

En este caso en lugar de usar un redistribuidor, se utiliza un colector y un distribuidor para la redistribución del líquido después de una sección de lecho. El colector escogido es el SLT, ya que aparte de ser un colector también es un soporte de relleno. El distribuidor utilizado es el mismo que en la parte superior de la torre.

Como para un relleno Mellapack es recomendable hacer redistribución de líquido cada 6 metros, en este caso que la altura de relleno es de 11,6 m, habría que poner un colector y distribuidor a lo largo de la columna a parte del distribuidor inicial en la parte alta de la torre.

❖ Soporte de relleno

En esta torre el soporte de relleno sólo se utiliza en la parte inferior de la columna ya bajo las secciones intermedias se utiliza el colector anterior que actúa también de soporte.

El soporte utilizado es el TEB/TSB de la empresa Sulzer, que se utiliza para rellenos estructurados.

❖ Entrada de gas

En las columnas con relleno estructurado, se debe producir una distribución de la corriente gaseosa en su ingreso al equipo, contrariamente a los casos de los rellenos al azar, donde es norma general no distribuir la fase gas.

Dado el tamaño de la columna el sistema de entrada de gas elegido es el GIV de la empresa Sulzer.

11.2.3.3.- Columna de rectificación (CD-602)

La única finalidad de esta columna es eliminar los posibles polímeros formados durante las operaciones de separación que se ha ido realizando tanto del acrilonitrilo como de los otros orgánicos presentes ya que a pesar de haber añadido inhibidores experimentalmente se observa cierta polimerización y es necesario eliminar esos

restos del producto final. Así pues esta columna de pequeñas dimensiones se debe a la suposición de que el 0.5% del acrilonitrilo polimeriza.

Estos son los esquemas de la columna y la especificación de los corrientes:

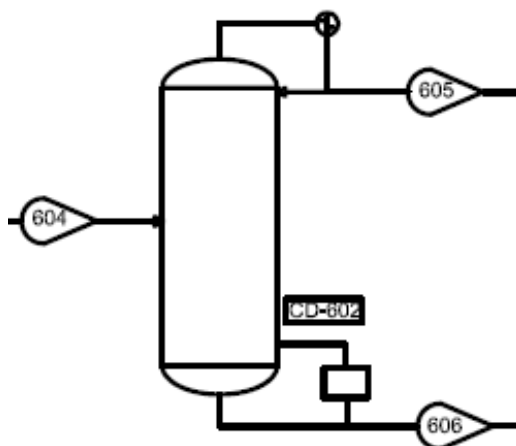


Figura 11.2.33.- Esquema de la columna CD-602.

Tabla 11.2.32.- Caracterización de los corrientes de la columna CD-602.

Nombre	604	605	606
Temperatura (°C)	46,700	49,776	75,308
Presión (bar)	0,400	0,4	0,4
Fración de vapor	0	0	0
Caudal molar (kmol/h)	120,080	119	1,079
Caudal másico (kg/h)	6349,048	6281,685	67,363
Caudal volumétrico (m ³ /h)	8,225	8,144	0,160
Densidad (kg/m ³)	771,954	420,923	771,302
Entalpía (Gcal/h)	4,259	0,018	4,251
FRACCIÓN MÁSSICA			
POLÍMERO	0,006		0,538
C ₃ H ₃ N=AN	0,991	0,977	0,462
C ₂ H ₃ N=ACN	25ppm	26ppm	
HCN			
H ₂ O	0,003	0,003	
CAUDAL MOLAR (kmol/h)			
POLÍMERO	0,581		0,581
C ₃ H ₃ N=AN	118,558	118,059	0,499
C ₂ H ₃ N=ACN	0,004	0,114	
HCN			
H ₂ O	0,937	0,937	

Así pues, modificando manualmente el corriente de salida de la columna CD-601 para obtener esta cantidad de polímero fijada por las experiencias narradas en la bibliografía (Dimian & Sorin, 2008), procedemos al dimensionamiento de la columna, directamente en Aspen Plus ya que fijamos unas dimensiones y relación de reflujo muy pequeños, y ya conocemos la cantidad de salida por colas de la columna porque será de nuevo, toda la cantidad de entrada del acrilonitrilo (ecuación 11.2). Seguimos el mismo esquema de resolución usado en todas las columnas:

SELECCIÓN DEL TIPO DE COLUMNA:

Lo primero a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía: Wankat, 2007:

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes ($>0.7\text{m}$).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños ($<0.7\text{m}$).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

Sabiendo que la columna anterior, por su caudal a tratar requería de un diámetro pequeño, y siendo esta columna más simple que la anterior, se fija una columna de relleno.

SELECCIÓN DEL TIPO DE FLUJO EN LA COLUMNA:

En una operación de rectificación se pueden obtener diferentes tipos de circulación, por su simplicidad y economía, a la par que por ser el más usado se usará el mismo tipo que en el de la columna CA-302. (Ver figura 11.4 para el modelo de flujo)

SELECCIÓN DEL TIPO DE RELLENO:

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro preestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (uniforme): Sulzer Mellapak 125 X .

RESULTADOS DE LA COLUMNA:

Para obtener el diámetro de la columna, se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007) usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados análogamente a lo realizado en la columna CA-302 visto en las figuras 11.8, 11.9, 11.10 y 11.11.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máximos a lo largo de la columna se aplican las ecuaciones (Ec.11.2.2), (Ec.11.2.3) y (Ec.11.2.4) con la figura 11.12 y se obtiene:

Tabla 11.2.33.- Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus:

Diámetro (m)	0,600
Número de etapas	7
HETP (m)	0,5
Presión de diseño (bar)	0,4
ΔP por sección (mBar/m)	0,800
ΔP total (bar)	0,0028
Relación de reflujo (L/D)	3

DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA:

A. Cálculo del espesor de la pared de la columna

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_P y T_P), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 75,3 °C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_P = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11.2.5})$$

$$T_P = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11.2.6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (—X—ray spot[®]).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.34.- Datos del espesor de las paredes:

P proyecto (Pa)	110000
Dint (mm)	600
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
e (mm)	0,359

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Kloppe ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

t : Espesor del cabezal torisférico (mm).

R_i : Radio interior de la columna (mm).

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11. 2. 10)}$$

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

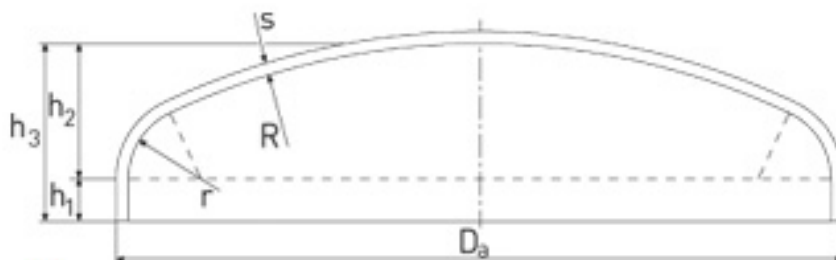


Figura 11.2.34.- Cabezal torisférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \text{ (Ec. 11. 2. 11)}$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.36.- Datos obtenidos para el cabezal

R(mm)	606
r(mm)	60,6
h1(mm)	10,5
h2(mm)	115,896
h3(mm)	126,396

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11.2.12})$$

$$V_i = 0,030 \text{ m}^3$$

$$V_e = 0,031 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,001 \text{ m}^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$\text{Presión}_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.2.13})$$

$$\text{Presión}_{fondo} = 1,608 \text{ bar}$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.37.- Datos obtenidos para el fondo:

t (mm)	3
Da (mm)	606
h3(mm)	126,396
Vpared (m^3)	0,0006

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$Altura_{total} = L + A_{cabezal} + A_{fondo} + 2 \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor...) En este caso se suman 2 metros.

$$Altura_{total} = 3,5 + 0,126 + 0,126 + 2$$

$$Altura_{total} = 5,753 \text{ m}$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$Area_{lateral} = 10,471 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

$$Peso_{columna\ vacio} = Peso_{de\ la\ carcasa\ lateral} + Peso_{cabezal} + Peso_{fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times espesor \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal\ y\ fondo} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna\ vacia} = 260,779 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de liquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i\text{cabezal}} + V_{i\text{fondo}} \right) \times \rho_{liq} \text{ (Ec. 11.2.19)}$$

$$\text{Peso del agua} = 1614,598 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del liquido} = 1580,682 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del relleno} = 98,960 \text{ kg}$$

$$\text{Peso}_{\text{columna llena}} =$$

$$\text{Peso de la columna vacía} + \text{Peso}_{\text{liquido}} + \text{peso}_{\text{del relleno}} \text{ (Ec. 11.2.20)}$$

$$\text{Peso de la columna llena agua} = 1974,337 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena liquido} = 1940,421 \text{ kg}$$

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior del quench se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C , una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de $0,5 \text{ m/s}$. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda.

Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.35 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.38.

Figura 11.2.35.- Datos seleccionados para el aislante

Tabla 11.2.38.- Espesores recomendados de aislante

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	48,14	12,7	78,07
Superficie plana vertical	51,45	12,7	74,81
Superficie plana horizontal Cara abajo	57,64	12,7	69,33

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11.2.39.- Características físicas principales de la columna CD-602

Presión de diseño (Pa)	40000
Temperatura de diseño (°C)	75,3
HETP (m)	0,5
Número de etapas	7
Altura de lecho empacado (m)	3,5
Altura total (m)	5,753
Espesor de cabezales (mm)	3 y 3
Espesor del aislante (mm)	12,7
Peso total columna vacía (kg)	260,779
Peso columna en operación (kg)	1940,421
Peso columna con agua (kg)	1974,337
Diámetro del lecho (m)	0,6
Diámetro total columna (m)	0,606
Entrada óptima (nº plato)	5

EQUIPOS INTERNOS DE LA COLUMNA:

Los equipos internos de esta columna se escogen de las recomendaciones que hace el catálogo de relleno estructurado de la empresa Sulzer. Para este tipo de relleno, Mellapak, se explican más detalladamente los equipos internos en la torre de absorción CA-302.

❖ **Relleno de la columna**

Los tipos de relleno de la columna y los motivos por los que se escoge, están explicados anteriormente. El relleno utilizado es el Mellapak 125 X de la empresa Sulzer.

❖ **Distribuidor de líquido**

Para esta torre se escoge un distribuidor tipo depresión (*Trough Distributors, NTD*), por su diámetro y caudal específico de líquido estándar. El distribuidor seleccionado es el VKGF de la empresa Sulzer. Este se coloca en la parte superior de la columna.

❖ Redistribución

Como para un relleno Mellapack es recomendable hacer redistribución de líquido cada 6 metros, en este caso que la altura de relleno es de 3,5 m, no hace falta hacer redistribución.

❖ Soporte de relleno

En esta torre el soporte de relleno sólo se utiliza en la parte inferior de la columna ya bajo las secciones intermedias se utiliza el colector anterior que actúa también de soporte. El soporte utilizado es el TEB/TSB de la empresa Sulzer, que se utiliza para rellenos estructurados.

❖ Entrada de gas

En las columnas con relleno estructurado, se debe producir una distribución de la corriente gaseosa en su ingreso al equipo, contrariamente a los casos de los rellenos al azar, donde es norma general no distribuir la fase gas. Dado el tamaño de la columna el sistema de entrada de gas elegido es el GIV de la empresa Sulzer.

11.2.3.4.- Columna de rectificación (CD-501)

El objetivo de la columna CD-501 reside en eliminar completamente los gases disueltos en el absorbedor con el fin de que por colas solo quede el ácido cianhídrico e inevitablemente el agua y los restos de orgánicos que lleva este corriente gaseoso, el cual se acabará de purificar en la columna posterior.

Estos son los esquemas de la columna y la especificación de los corrientes:

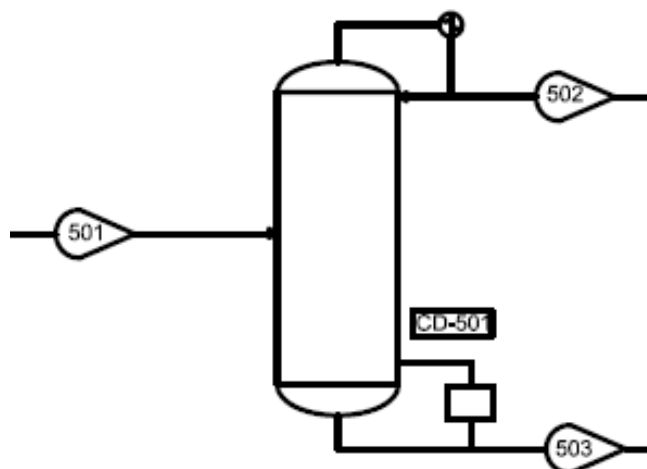


Figura 11.2.36.-Esquema de la columna CD-501

Tabla 11.2.40.- Especificaciones de los corrientes de la columna CD-501

Nombre	501	502	503
Temperatura (°C)	15	-9,99	77,0431811
Presión (bar)	5,06625	5,067	5,11949755
Fracción de vapor	0,288	1	0
Caudal molar (kmol/h)	89	31	58
Caudal másico (kg/h)	2669,328	1081,219	1588,108
Caudal volumétrico (m3/h)	121,675	130,018	2,644
Densidad (kg/m3)	21,938	8,316	600,565
Entalpía (Gcal/h)	1,0457	-0,436	1,544
FRACCIÓN MÁSCICA			
N2	0,148	0,364	
O2	0,016	0,039	
C3H6	0,142	0,351	
C3H4O=ACR	7,238E-4		0,001
C3H3N=AN	0,016		0,026
C2H3N=ACN	322ppb		0,541ppm
HCN	0,587	0,021	0,972
CO2	0,084	0,207	
CO	0,007	0,017	
H2O	600ppm		0,001
CAUDAL MOLAR (kmol/h)			
N2	14,061	14,061	
O2	1,304	1,304	
C3H6	9,032098	9,032098	
C3H4O=ACR	0,0345		0,0345
C3H3N=AN	0,784		0,784
C2H3N=ACN	2,09E-05		2,09E-05

HCN	57,950	0,858	57,092
CO2	5,089624	5,089624	
CO	0,6558679	0,6558679	
H2O	0,089		0,089

Para la columna CD-501 se hizo en primera instancia un diseño con el método de Short cut con Hysys indicando cuales eran las fracciones molares de salida deseadas tanto por cabezas como por colas de la columna, la presión de operación y una relación de reflujo aproximada, obteniéndose:

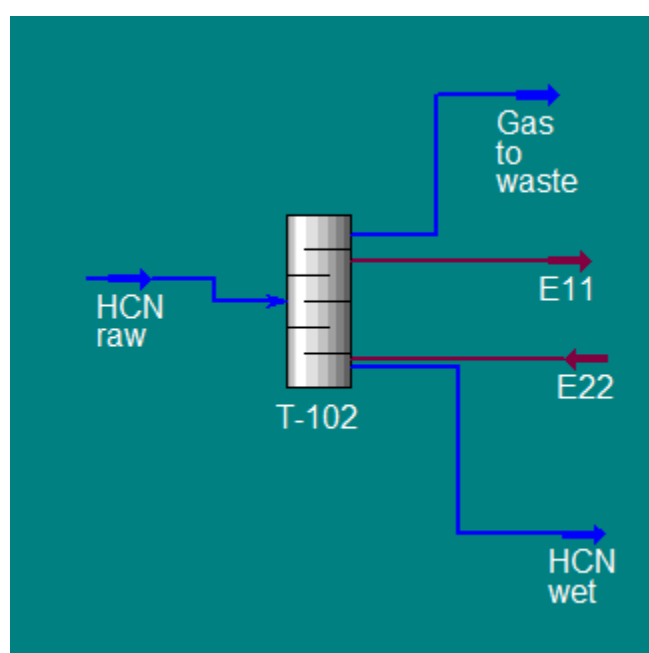


Figura 11.2.37.- Esquema de cálculo en Aspen Hysys con el método de Short cut.

Lo primero que se observa en esta columna es que no podemos seguir trabajando al vacío, debido a que al querer separar gases parcialmente solubles en agua, para conseguir las especificaciones deseadas de HCN deberíamos trabajar a temperaturas muy bajas en el condensador, y para evitar temperaturas inasumibles, decidimos operar la columna a presión.

Tabla 11.2.41.- Resultados del método de Short cut obtenidos con Aspen Hysys

Número de etapas teórico aprox.	12
Relación de reflujo mínima	0,254
Entrada óptima (nº de plato)	9
Presión de diseño (bar)	5
Bottoms rate (kmol/h)	59

SELECCIÓN DEL TIPO DE COLUMNA:

El siguiente paso a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía: Wankat, 2007:

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

Como en el resto del proceso usaremos empaques, y por los caudales a tratar, estimamos que será del tipo aleatorio.

SELECCIÓN DEL TIPO DE FLUJO EN LA COLUMNA:

En una operación de rectificación se pueden obtener diferentes tipos de circulación, por su simplicidad y economía, a la par que por ser el más usado se usará el mismo tipo que en el de la columna CA-302. (Ver figura 11.4 para el modelo de flujo)

SELECCIÓN DEL TIPO DE RELLENO:

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro preestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (aleatorio): Flexirings (Glitsch)-Inox 2”.

RESULTADOS DE LA COLUMNA:

Para obtener el diámetro de la columna, se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007) usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados análogamente a lo realizado en la columna CA-302 visto en las figuras 11.8, 11.9, 11.10 y 11.11.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máximos a lo largo de la columna se aplican las ecuaciones (Ec.11.2.2), (Ec.11.2.3) y (Ec.11.2.4) con la figura 11.12 y se obtiene:

Tabla 11.2.42.- Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus

Diámetro (m)	0,124
Número de etapas	14
HETP (m)	0,2
Presión de diseño (bar)	5
ΔP por sección (mBar/m)	4,271
ΔP total (bar)	0,0120
Relación de reflujo (L/D)	5

DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA

A. Cálculo del espesor de la pared de la columna

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_P y T_P), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 76,525 °C, y la presión de operación que es 5 bar.

$$P_P = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11.2.5})$$

$$T_P = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11.2.6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.43.-Datos del espesor de las paredes

P proyecto (Pa)	550000
Dint (mm)	124
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
e (mm)	0,372

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11. 2. 10)}$$

$$\text{espesor del cabezal (t) = 3 mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

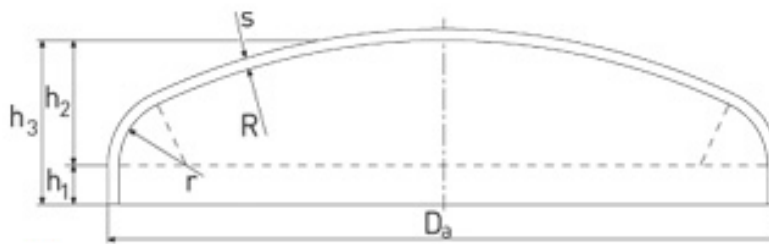


Figura 11. 2.38.- Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \text{ (Ec. 11. 2. 11)}$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.44.-Datos obtenidos para el cabezal:

R(mm)	130
r(mm)	13
h1(mm)	10,5
h2(mm)	23,79
h3(mm)	34,29

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

11. Manual de cálculo

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \text{ (Ec. 11. 2. 12)}$$

$$V_i = 0,0013m^3$$

$$V_e = 0,0014 m^3$$

$$V_{pared} = 0,0001 m^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$Presión_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \text{ (Ec. 11. 2. 13)}$$

$$Presión_{fondo} = 504400 Pa$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.45.-Datos obtenidos para el fondo

t (mm)	3
Da (mm)	130
h3(mm)	34,29
Vpared (m^3)	0,0001

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$Altura_{total} = L + A_{cabezal} + A_{fondo} + 2 \text{ (Ec. 11. 2. 14)}$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor...) En este caso se suman 2 metros.

$$Altura_{total} = 2,8 + 0,034 + 0,034 + 2$$

$$Altura_{total} = 4,868 m$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \text{ (Ec. 11. 2. 15)}$$

$$Area_{lateral} = 1,960 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacio

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times \text{espesor} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal \text{ y fondo}} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna \text{ vacia}} = 49,052 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de liquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{icabezal} + V_{ifondo} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$Peso \text{ del agua} = 60,515 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del liquido} = 57,141 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del relleno} = 101,988 \text{ kg}$$

$Peso_{columna\ llena}$

$$= Peso_{de\ la\ columna\ vacia} + Peso_{liquido} \\ + peso_{del\ relleno} \quad (\mathbf{Ec. 11.2.20})$$

$$Peso\ de\ la\ columna\ llena\ agua = 211,555kg$$

$$Peso\ de\ la\ columna\ llena\ liquido = 208,181\ kg$$

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es mantas aislantes de $140\ kg/m^3$ y para la temperatura interior del quench se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen $45^{\circ}C$, una temperatura ambiente de $25^{\circ}C$ y una velocidad superficial del aire de $0,5\ m/s$. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda. Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.39 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.46.

Figura 11.2.39.- Datos escogidos para el aislante

Tabla 11.2.46.-Espesores recomendados para el aislante

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	38,49	25,4	89,02
Superficie plana vertical	40,41	25,4	87,47
Superficie plana horizontal Cara abajo	44,02	25,4	84,54

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11. 2.47.- Características físicas principales de la columna CD-501.

Presión de diseño (Pa)	500000
Temperatura de diseño (°C)	76,525
HETP (m)	0,2
Número de etapas	14
Altura de lecho empacado (m)	2,8
Altura total (m)	4,868
Espesor de cabezales (mm)	3
Espesor del aislante (mm)	25,4
Peso total columna vacía (kg)	49,052
Peso columna en operación (kg)	208,181
Peso columna con agua (kg)	211,555
Diámetro del lecho (m)	0,124
Diámetro total columna (m)	0,13
Entrada óptima (nº plato)	9

INTERIOR DE LA COLUMNA:

Los equipos del interior de la columna para rellenos Flexiring, como los de esta torre, son explicados en la columna Quench CA-301.

❖ **Relleno de la columna**

Anteriormente ya fue explicado, que tipo de relleno se seleccionó y los motivos.

Los rellenos utilizados para esta columna de absorción son los Flexiring de la empresa Koch-glitsch, de material acero inoxidable y con unas dimensiones de 2 in.

❖ **Distribuidor de líquido**

El tipo de distribuidor seleccionado es el distribuidor tipo PAN. Como el material que usamos es acero inoxidable el diámetro mínimo de orificio recomendado es 0,1875 in. Como el tamaño del relleno usado es 2 in que es un tamaño medio, el número de puntos de goteo por ft² (Drip Points/Ft²) es de 6-8. El distribuidor elegido es el de la empresa rvt Process Equipment.

❖ Soporte de rellenos

Dado el tamaño de la columna y para un buen aguante del relleno y distribución de gas y líquido, el soporte que se selecciona es el soporte de relleno con pasajes de flujo separados líquido y gas.

El soporte elegido es el TS804 Random Packing gas-injection support de la empresa Koch-glitsch.

❖ Redistribuidor

Como la altura del lecho es de 3,5 m, no hace falta ningún redistribuidor a lo largo de la columna. Con el distribuidor de la parte superior es suficiente para mantener una buena transferencia en esta torre.

❖ Entrada gas

El gas entra por la parte inferior de la columna, no necesita distribuidor, simplemente una placa colocada por el interior de la columna para impedir que el líquido al caer perturbe la entrada de gas.

11.2.3.5.- Columna de rectificación (CD-502)

El objetivo de la columna CD-502 es eliminar los restos de orgánicos tales como acrilonitrilo, acroleína etc. Además del agua del HCN para obtener este con especificación de producto para poder realizar la venta de este subproducto de valor añadido.

Estos son los esquemas de la columna y la especificación de los corrientes:

Tabla 11.2.48.- Especificaciones de los corrientes de la columna CD-502

Nombre	503	504	505
Temperatura (°C)	77,043	25,663	68,509
Presión (bar)	5,119	1,013	1,056
Fracción de vapor	0	1	0
Caudal molar (kmol/h)	58	57	1
Caudal másico (kg/h)	1588,108	1540,520	47,588
Caudal volumétrico (m3/h)	2,644	1368,130	0,064
Densidad (kg/m3)	600,565	1,126	741,367
Entalpía (Gcal/h)	1,544	1,838	0,025
FRACCIÓN MÁSICA			
C3H4O=ACR	0,001	48ppm	0,039
C3H3N=AN	0,026		0,874
C2H3N=ACN	0,541ppm		18ppm
HCN	0,972	1,00	0,054
H2O	0,001		0,034
CAUDAL MOLAR (kmol/h)			
C3H4O=ACR	0,034	0,001	0,033
C3H3N=AN	0,783		0,783
C2H3N=ACN	2,09E-05		2,09E-05
HCN	57,092	56,997	0,094
H2O	0,089		0,089

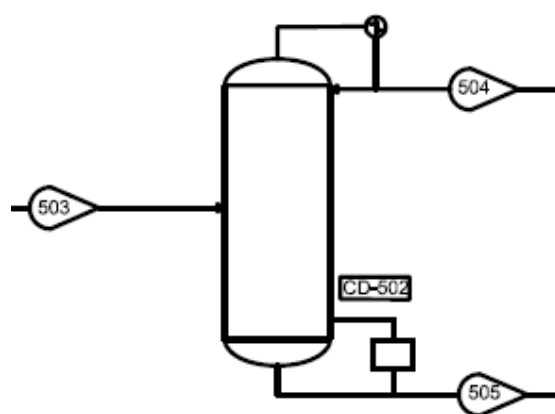


Figura 11.2.8.- Esquema de la columna CD-502

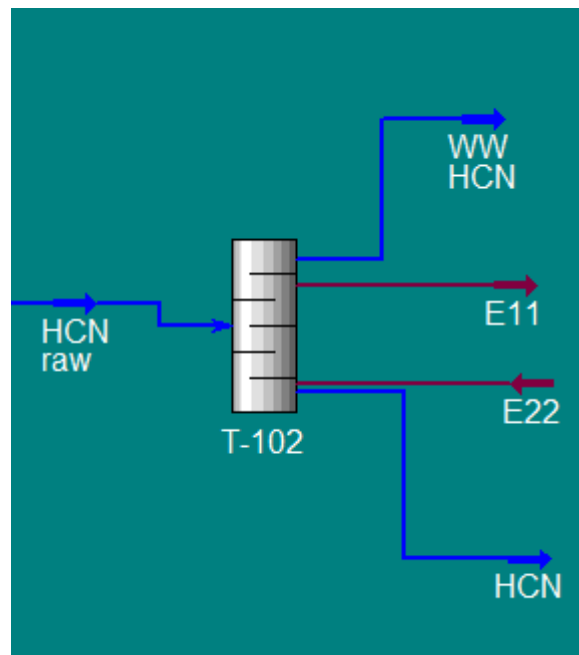


Figura 11.2.41.- Esquema de cálculo en Aspen Hysys con el método de Short cut

Para la columna CD-502 se hizo en primera instancia un diseño con el método de Short cut con Hysys indicando cuales eran las fracciones molares de salida deseadas tanto por cabezas como por colas de la columna, la presión de operación y una relación de reflujo aproximada, obteniéndose:

Tabla 11.2.49.- Resultados del método de Short cut obtenidos con Aspen Hysys

Número de etapas teórico aprox.	8
Relación de reflujo mínima	1,221
Entrada óptima (nº de plato)	5

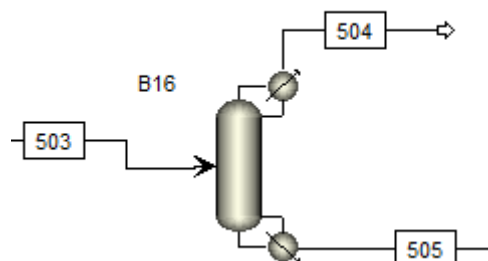


Figura 11.2.42.- Esquema del bloque introducido en Aspen Plus

SELECCIÓN DEL TIPO DE COLUMNA:

Lo primero a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía (Wankat, 2007).

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

De nuevo nos basaremos en los datos de la bibliografía (Dimian & Sorin, 2008) y siguen requiriendo columnas de platos debido a los elevados caudales a tratar.

SELECCIÓN DEL TIPO DE FLUJO EN LA COLUMNA:

En una operación de rectificación se pueden obtener diferentes tipos de circulación, por su simplicidad y economía, a la par que por ser el más usado se usará el mismo tipo que en el de la columna CA-302. (Ver figura 11.4 para el modelo de flujo)

SELECCIÓN DEL TIPO DE RELLENO:

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro prestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (aleatorio): Flexirings (Glitsch)-Inox 2”.

RESULTADOS DE LA COLUMNA:

Para obtener el diámetro de la columna, se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007) usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados análogamente a lo realizado en la columna CA-302 visto en las figuras 11.8, 11.9, 11.10 y 11.11.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máxicos a lo largo de la columna se aplican las ecuaciones (Ec.11.2.2), (Ec.11.2.3) y (Ec.11.2.4) con la figura 11.12 y se obtiene:

Tabla 11. 2.50.-Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus

Diámetro (m)	0,244
Número de etapas	14
HETP (m)	0,4
Presión de diseño (bar)	1
ΔP por sección (mBar/m)	3,932
ΔP total (bar)	0,0120
Relación de reflujo (L/D)	4

DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA:A. Cálculo del espesor de la pared de la columna

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 68,197 °C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_p = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11. 2. 5})$$

$$T_p = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11. 2. 6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (—X—ray spot[®]).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$e = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11. 2. 7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11. 2.51.- Datos del espesor de las paredes:

P proyecto (Pa)	110000
Dint (mm)	244
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (bar)	108248000
e (mm)	0,146

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11. 2. 8)}$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente formula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \text{ (Ec. 11. 2. 9)}$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11. 2. 10)}$$

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

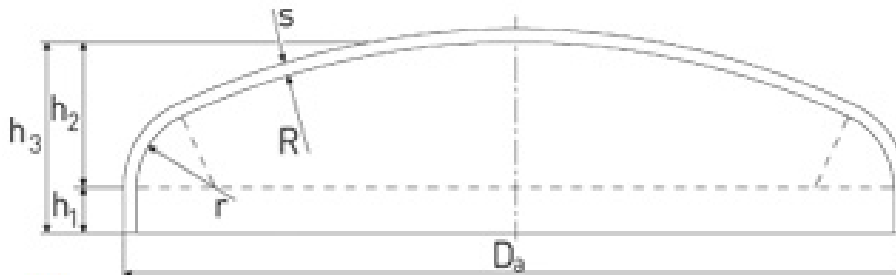


Figura 11.2.43.- Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \text{ (Ec. 11. 2. 11)}$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11. 2.52.- Datos obtenidos para el cabezal:

(mm)	250
r(mm)	25
h1(mm)	10,5
h2(mm)	47,01
h3(mm)	57,51

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

11. Manual de cálculo

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11.2.12})$$

$$V_i = 0,0050 m^3$$

$$V_e = 0,0053 m^3$$

$$V_{pared} = 0,0003 m^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$\text{Presión}_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.2.13})$$

$$\text{Presión}_{fondo} = 180300 Pa$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.53.- Datos obtenidos para el fondo:

t (mm)	3
Da (mm)	250
h3(mm)	57,51
Vpared (m^3)	0,0002

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$\text{Altura total} = L + A \text{ cabezal} + A \text{ fondo} + 2 \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor...) En este caso se suman 2 metros.

$$\text{Altura}_{total} = 5,600 + 0,057 + 0,057 + 2$$

$$\text{Altura}_{total} = 7,715 m$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$Area_{lateral} = 5,970 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

*Peso columna vacío = Peso de la carcasa lateral + Peso cabezal +
Peso fondo (Ec. 11.2.16)*

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times \text{espesor} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal \text{ y } fondo} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna \text{ vacía}} = 147,088 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de liquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i \text{ cabezal}} + V_{i \text{ fondo}} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$Peso \text{ del agua} = 365,125 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del liquido} = 344,766 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del relleno} = 789,796 \text{ kg}$$

Peso columna llena =

Peso de la columna vacía + Peso liquido + peso del relleno (Ec. 11.2.20)

Peso de la columna llena agua = 1302,009kg

Peso de la columna llena liquido = 1281,650 kg

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m³ y para la temperatura interior del quench se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C, una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de 0,5 m/s. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda. Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.44 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.54.

Cálculo de Espesor Óptimo - Pérdida de Calor - Equipos [1]

CALORCOL
LANA MINERAL DE ROCA

Mantas Aislantes de 140 kg/m³

Datos de Entrada

Temperatura Interior:	88.197	°C	
Temperatura Superficie Aislamiento:	45	°C	
Temperatura Ambiente:	25	°C	
Velocidad del Aire:	0.5	m/s	
Superficie Exterior Aislamiento:	7	Emisividad:	0.13
Superficie Desnuda:	2	Emisividad:	0.3

Calcular Cancelar Graficar

Figura 11.2.44.- Datos escogidos para el aislante

Tabla 11. 2.54.- Espesores recomendados para el aislante

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	54,57	12,7	78,33
Superficie plana vertical	48,36	12,7	75,28
Superficie plana horizontal Cara abajo	53,34	12,7	70,5

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11.2.55.- Características físicas principales de la columna CD-502

Presión de diseño (Pa)	100000
Temperatura de diseño (°C)	68,197
HETP (m)	0,4
Número de etapas	14
Altura de lecho empacado (m)	5,6
Altura total (m)	7,715
Espesor de cabezales (mm)	3
Espesor del aislante (mm)	12,7
Peso total columna vacía (kg)	147,088
Peso columna en operación (kg)	1281,65
Peso columna con agua (kg)	1302,009
Diámetro del lecho (m)	0,244
Diámetro total columna (m)	0,25
Entrada óptima (nº plato)	5

INTERIOR DE LA COLUMNA:

Los equipos del interior de la columna para rellenos Fexiring, como los de esta torre, son explicados en la columna Quench CA-301.

❖ Relleno de la columna

Anteriormente ya fue explicado, que tipo de relleno se seleccionó y los motivos. Los rellenos utilizados para esta columna de absorción son los Flexiring de la empresa Koch-glitsch, de material acero inoxidable y con unas dimensiones de 2 in.

❖ Distribuidor de líquido

El tipo de distribuidor seleccionado es el distribuidor tipo PAN. Como el material que usamos es acero inoxidable el diámetro mínimo de orificio recomendado es 0,1875 in. Como el tamaño del relleno usado es 2 in que es un tamaño medio, el número de puntos de goteo por ft^2 (Drip Points/ Ft^2) es de 6-8. El distribuidor elegido es el de la empresa rvt Process Equipment.

❖ Soporte de rellenos

Dado el tamaño de la columna y para un buen aguante del relleno y distribución de gas y líquido, el soporte que se selecciona es el soporte de relleno con pasajes de flujo separados líquido y gas. El soporte elegido es el TS804 Random Packing gas-injection support de la empresa Koch-glitsch.

❖ Redistribuidor

El redistribuidor seleccionado es el de tipo Hold-down Grids, y como esta torre es de 5,60 m de lecho, se pone un distribuidor en la parte superior de la torre y bajo 3 m de lecho se pone un redistribuidor.

❖ Entrada gas

El gas entra por la parte inferior de la columna, no necesita distribuidor, simplemente una placa colocada por el interior de la columna para impedir que el líquido al caer perturbe la entrada de gas.

11.2.3.6.- Columna de rectificación (CD-701)

Esta columna tiene como objetivo fundamental separar el acetonitrilo del agua, ya que al haber realizado la rectificación extractiva, se ha usado un cabal muy elevado de esta, y para proceder a poder tratar con mayor eficiencia el acetonitrilo, se debe separar al

máximo posible del agua, pero esto no se podrá realizar de manera eficiente, y así aprovechar el acetonitrilo ya que este último forma un homoazeótropo con el agua. Se ha estudiado la posibilidad de usar métodos avanzados de separación de este en columnas posteriores, pero como ya se ha comentado, se ha desestimado por su elevado coste y complejidad, así pues, el objetivo real de la columna será dejar por colas de la columna el agua del proceso lo más limpia posible para su reutilización y así minimizar el consumo de esta y la necesidad de tratarla posteriormente.

Estos son los esquemas de la columna y la especificación de los corrientes:

Tabla 11.2.56.- Especificaciones de los corrientes de la columna CD-701:

Nombre	310	701	702
Temperatura (°C)	74,100	68,700	75,900
Presión (bar)	0,400	0,400	0,400
Fracción de vapor	0,000	1,000	0,000
Caudal molar (kmol/h)	9106,000	40,000	9066,000
Caudal másico (kg/h)	164316,539	983,849	163332,690
Caudal volumétrico (m3/h)	174,353	2828,066	173,134
Densidad (kg/m3)	942,436	0,348	943,389
Entalpía (Gcal/h)	-612,568	-1,439	-610,644
FRACCIÓN MÁSIKA			
C3H3N=AN	336ppm	0,056	6ppb
C2H3N=ACN	0,003	0,409	67ppm
HCN	18ppm	0,003	748ppb
H2O	0,997	0,532	1,000
CAUDAL MOLAR (kmol/h)			
C3H3N=AN	1,041	1,041	
C2H3N=ACN	10,067	9,802	0,266
HCN	0,110	0,106	0,005
H2O	9094,782	29,052	9065,730

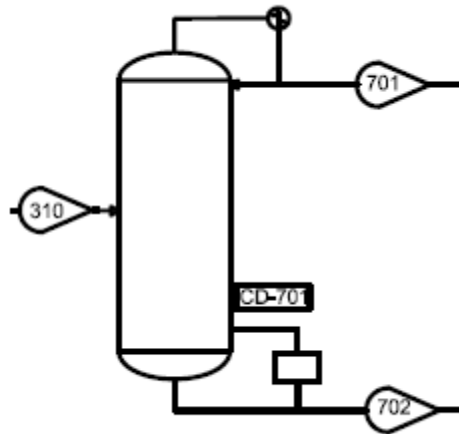


Figura 11.2.45.- Esquema de la columna CD-701.

Para la columna CD-701 se hizo en primera instancia un diseño con el método de Short cut con Hysys indicando cuales eran las fracciones molares de salida deseadas tanto por cabezas como por colas de la columna, la presión de operación y una relación de reflujo aproximada, obteniéndose:

Tabla 11.2.57.- Resultados del método de Short cut obtenidos con Aspen Hysys:

Número de etapas teórico aprox.	30
Relación de reflujo mínima	0,784
Entrada óptima (nº de plato)	25

El esquema resultante en Aspen Plus para su diseño es:

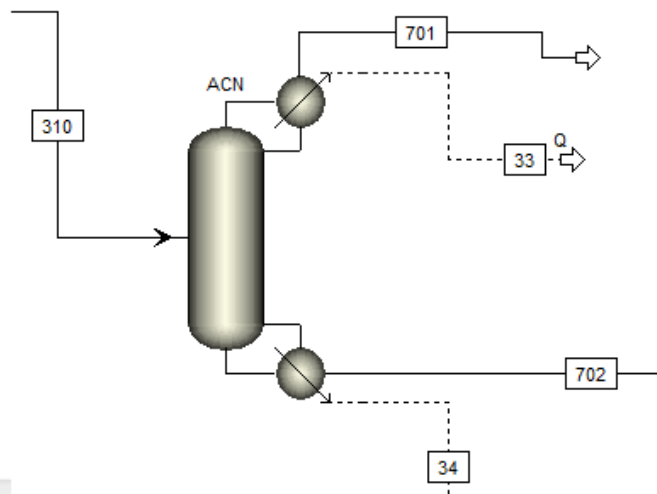


Figura 11.2.46.- Esquema de la columna CD-701 en Aspen Plus.

SELECCIÓN DEL TIPO DE COLUMNA:

Lo primero a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía (Wankat, 2007)

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

Como en las columnas previas, nos basaremos en los datos de la bibliografía (Dimian & Sorin, 2008) y de nuevo requieren columnas de grandes dimensiones, así pues, usaremos una columna de platos.

SELECCIÓN DEL TIPO DE FLUJO EN LA COLUMNA:

En una operación de rectificación se pueden obtener diferentes tipos de circulación, por su simplicidad y economía, a la par que por ser el más usado se usará el mismo tipo que en el de la columna CA-302. (Ver figura 11.4 para el modelo de flujo)

SELECCIÓN DEL TIPO DE RELLENO:

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro prestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (uniforme): Sulzer Mellapak 125 X .

RESULTADOS DE LA COLUMNA:

Para obtener el diámetro de la columna, se usa el método de Eckert siguiendo los consejos del libro de Wankat (2007) usando los parámetros obtenidos de un diseño riguroso realizado con el software Aspen Plus.

Simulando la columna en Aspen para obtener los rendimientos de purificación deseados análogamente a lo realizado en la columna CA-302 visto en las figuras 11.8, 11.9, 11.10 y 11.11.

Ahora, teniendo los parámetros necesarios de caudales máxicos máxicos a lo largo de la columna se aplican las ecuaciones (Ec.11.2.2), (Ec.11.2.3) y (Ec.11.2.4) con la figura 11.12 y se obtiene:

Tabla 11. 2.58.-Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus:

Diámetro (m)	0,745
Número de etapas	29
HETP (m)	0,4
Presión de diseño (bar)	0.4
ΔP por sección (mBar/m)	3,932
ΔP total (bar)	0,0120
Relación de reflujo (L/D)	8

DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA:**A. Cálculo del espesor de la pared de la columna**

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 75,86°C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_p = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11. 2. 5})$$

$$T_p = T_{operación} + 20^\circ C \quad (\text{Ec. 11. 2. 6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (—X—ray spot[®]).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.59.- Datos del espeso de las paredes:

P proyecto (Pa)	110000
Dint (mm)	749
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
e (mm)	0,448

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$e = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.10})$$

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

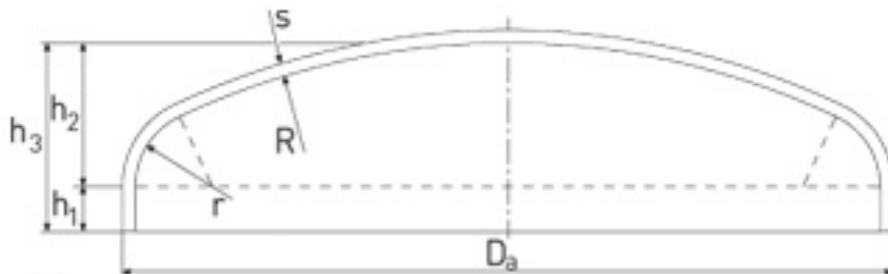


Figura 11.2.47.- Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = D_a$$

$$r = 0,1 \times D_a$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times D_a - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11.2.11})$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.60.- Datos obtenidos para el cabezal

R(mm)	755
r(mm)	75,5
h1(mm)	10,5
h2(mm)	144,727
h3(mm)	155,227

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11.2.12})$$

$$V_i = 0,0475 m^3$$

$$V_e = 0,0483 m^3$$

$$V_{pared} = 0,0008 m^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$Presión_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.2.13})$$

$$Presión_{fondo} = 235700 Pa$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.61.- Datos obtenidos para el fondo

t (mm)	4
Da (mm)	757
h3(mm)	158,659
Vpared (m^3)	0,001

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$Altura_{total} = L + A_{cabezal} + A_{fondo} + 2 \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor...) En este caso se suman 2 metros.

$$Altura_{total} = 11,6 + 0,155 + 0,158 + 2$$

$$Altura_{total} = 13,914 \text{ m}$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$Area_{lateral} = 32,258 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacío

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times \text{espesor} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal \text{ y fondo}} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna \text{ vacía}} = 787,477 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de liquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i\text{cabezal}} + V_{i\text{fondo}} \right) \times \rho_{liq} \text{ (Ec. 11. 2. 19)}$$

$$\text{Peso del agua} = 6081,808 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del liquido} = 5742,685 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del relleno} = 511,107 \text{ kg}$$

Peso_{columna llena}

$$= \text{Peso de la columna vacía} + \text{Peso liquido}$$

$$+ \text{peso del relleno} \text{ (Ec. 11. 2. 120)}$$

$$\text{Peso de la columna llena agua} = 7380,392 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena liquido} = 7041,269 \text{ kg}$$

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m³ y para la temperatura interior del quench se coge la de proyecto. Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C, una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de 0,5 m/s. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda. Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.48 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.61.

Figura 11.2.48.- Datos escogidos para el aislante.

Tabla 11.2.61.- Espesores de aislante recomendado

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	38,35	25,4	89,03
Superficie plana vertical	40,25	25,4	87,39
Superficie plana horizontal Cara abajo	43,78	25,4	84,63

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11.2.62.- Características físicas principales de la columna CD-701:

Presión de diseño (Pa)	40000
Temperatura de diseño (°C)	75,861
HETP (m)	0,4
Número de etapas	29
Altura de lecho empacado (m)	11,6
Altura total (m)	13,914
Espesor de cabezales (mm)	3 y 4
Espesor del aislante (mm)	25,4
Peso total columna vacía (kg)	787,477
Peso columna en operación (kg)	7041,269
Peso columna con agua (kg)	7380,392
Diámetro del lecho (m)	0,745
Diámetro total columna (m)	0,755
Entrada óptima (nº plato)	22

EQUIPOS INTERNOS DE LA COLUMNA:

Los equipos internos de esta columna se escogen de las recomendaciones que hace el catálogo de relleno estructurado de la empresa Sulzer.

Y para este tipo de relleno, Mellapak, se explican más detalladamente los equipos internos en la torre de absorción CA-302.

❖ **Relleno de la columna**

Los tipos de relleno de la columna y los motivos por los que se escoge, están explicados anteriormente. El relleno utilizado es el Mellapak 125 X de la empresa Sulzer.

❖ **Distribuidor de líquido**

Para esta torre se escoge un distribuidor tipo depresión (*Trough Distributors, NTD*), por su diámetro y caudal específico de líquido estándar. El distribuidor seleccionado es el VKGF de la empresa Sulzer. Este se coloca en la parte superior de la columna.

❖ Redistribución

En este caso en lugar de usar un redistribuidor, se utiliza un colector y un distribuidor para la redistribución del líquido después de una sección de lecho. El colector escogido es el SLT, ya que aparte de ser un colector también es un soporte de relleno. El distribuidor utilizado es el mismo que en la parte superior de la torre.

Como para un relleno Mellapack es recomendable hacer redistribución de líquido cada 6 metros, en este caso que la altura de relleno es de 11,6 m, habría que poner un colector y distribuidor a lo largo de la columna a parte del distribuidor inicial en la parte alta de la torre.

❖ Soporte de relleno

En esta torre el soporte de relleno sólo se utiliza en la parte inferior de la columna ya bajo las secciones intermedias se utiliza el colector anterior que actúa también de soporte.

El soporte utilizado es el TEB/TSB de la empresa Sulzer, que se utiliza para rellenos estructurados.

❖ Entrada de gas

En las columnas con relleno estructurado, se debe producir una distribución de la corriente gaseosa en su ingreso al equipo, contrariamente a los casos de los rellenos al azar, donde es norma general no distribuir la fase gas. Dado el tamaño de la columna el sistema de entrada de gas elegido es el GIV de la empresa Sulzer.

11.2.4.- Quench (CA-301)

La columna de quenching tiene una doble función. Por un lado, queremos refrigerar de manera súbita la salida del reactor de manera rápida y económica para evitar las reacciones de polimerización de los productos formados, pero por otro lado también queremos eliminar todo el amoníaco del sistema ya que este sería aún una fuente de polimerización muy grande debido a las condiciones que tenemos este corriente. Así

pues con este fin, se procede al quenching del corriente. Pero un punto a favor de este modo de refrigerar frente otros es que, no solo eliminamos el amoníaco totalmente del sistema, sino además estamos reaprovechándolo generando un producto de valor añadido como es el sulfato de amonio.

Tabla 11.2.63.- Especificaciones de los corrientes de la columna CA-301

Nombre	314	219	301	302
Temperatura (°C)	25,000	220,000	70,100	71,700
Presión (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013
Fracción de vapor	0,000	1,000	1,000	0,000
Caudal molar (kmol/h)	729,180	2943,532	3156,949	429,903
Caudal másico (kg/h)	16756,732	80118,646	83966,325	11449,379
Caudal volumétrico (m3/h)	15,832	119035,869	88671,518	10,980
Densidad (kg/m3)	1058,409	0,673	0,947	1042,749
Entalpía (Gcal/h)	-55,235	-33,672	-54,121	-33,997
FRACCIÓN MÁSCICA				
NH3		0,019		0,003
H2SO4	0,265			0,387
N2		0,625	0,596	459ppm
O2		0,022	0,021	43ppm
C3H6		0,022	0,021	537ppm
C3H4O=ACR		25ppm	23ppm	2ppm
C3H3N=AN	4ppb	0,083	0,078	0,008
C2H3N=ACN	43ppm	0,005	0,005	0,001
HCN	482ppb	0,020	0,019	0,003
CO2		0,036	0,035	465ppm
CO		0,022	0,021	20ppm
H2O	0,735	0,145	0,204	0,596
CAUDAL MOLAR (kmol/h)				
NH3		90,420		
H2SO4	45,213			
N2		1786,200	1786,022	0,188
O2		54,508	54,495	0,018
C3H6		42,785	42,660	0,146
C3H4O=ACR		0,035	0,035	
C3H3N=AN	1,33E-06	125,624	123,990	1,620
C2H3N=ACN	0,018	10,230	9,866	0,355
HCN	3,06E-4	59,533	58,057	1,461
CO2		66,372	66,293	0,121
CO		62,717	62,702	0,015
H2O	683,949	645,108	952,829	378,182

Y este es su esquema:

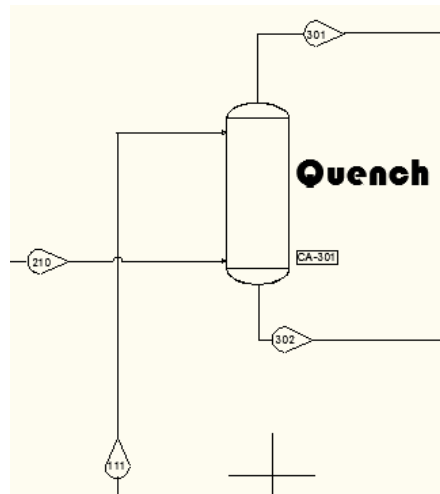


Figura 11.2.49.- Esquema Columna CA-301.

Para dimensionar esta columna, se han tenido en cuenta unas cuantas aproximaciones para simplificar su diseño:

- La reacción entre el amoníaco y el sulfúrico es instantánea y de conversión total.
- El calor de reacción entre ellos es menospreciable.

Consideradas estas dos aproximaciones, se puede aproximar el diseño de la unidad de Quench como a un absorbedor.

Lo primero a considerar para introducir los parámetros al software usado (Aspen Plus) es que el sulfato de amonio descompone a 337 grados, pues la temperatura en el interior del Quench no podrá superar este valor, así, requerimos de un enfriamiento previo en el exterior el cual impida que el alimento entre a una temperatura mayor ya que aunque el contacto enfríe el corriente, al ser una reacción exotérmica podríamos tener problemas, así pues, enfriamos por debajo de esa temperatura límite pero no en exceso, fijando esos 220°C de entrada.

El siguiente paso es cuantificar la cantidad de sulfúrico necesario, ya que si suponemos la reacción total, requerimos de la cantidad estequiométricamente necesaria para la reacción, la cual es:

$$Massa\ sulfúrico = 2 \cdot Moles\ Amoníaco \cdot PM_{Sulfúrico} \quad (\text{Ec. 11. 2. 22})$$

El resultado se puede ver en la tabla 11.2.63.

El siguiente paso es cuantificar aproximadamente el caudal de agua necesario para introducirlo al simulador y que este haga el diseño estricto. Para ello se realiza un pequeño balance de energía en el cual se introduzca agua suficiente la cual evaporándose consiga refrigerar el corriente de proceso, pero que como resultado tengamos al menos, la cantidad de agua necesaria para que el sulfato de amonio formado sea soluble ya que si se saturara el caudal líquido, se nos quedaría el relleno de la columna con incrustaciones de esta sal, situación del todo indeseable.

Sabiendo de la bibliografía que el sulfato amónico tiene una solubilidad a 71 °C de 90g/100g de agua, podemos saber que para los 5974,14 kg sulfato amónico/h esperados, se requiere:

$$5974,14 \frac{\text{kg sulfato amónico}}{\text{h}} \cdot \frac{100 \text{ kg agua}}{90 \text{ kg sulfato amónico}} = 6637,78 \text{ kg/h}$$

Y por el balance de energía se obtiene:

$$q_{eliminado} = m_{sulfúrico} \cdot Cp_{sulfúrico} \cdot \Delta T + m_{agua} \cdot Cp_{agua} \cdot \Delta T + m_{agua} \cdot \lambda_{agua} \quad (\text{Ec. 11. 2. 23})$$

$$q_a\ eliminar = m_{corriente\ 209} \cdot Cp_{corriente\ 209} \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 11. 2. 24})$$

El sistema de ecuaciones Ec.11.2.132 y Ec.11.2.133 se obtiene el m_{agua} :

$$m_{agua} = 4734,35 \text{ kg/h}$$

Así, con estos valores como iteración inicial, se introducen al simulador Aspen Plus para dimensionar la columna pertinente.

Cabe recordar, que es interesante minimizar este caudal ya que si este es muy grande, no solo logramos un buen contacto entre fases, sino que además absorbemos orgánicos de proceso, que son nuestros productos, por tanto, situación nada recomendable.

SELECCIÓN DEL TIPO DE COLUMNA:

Lo primero a realizar es decidir qué tipo de columna vamos a caracterizar, si una de relleno o una de platos, así pues, estudiamos los siguientes consejos obtenidos del libro de la bibliografía: Wankat, 2007:

Condiciones favorables para una columna de platos:

- Diámetros de columna grandes (>0.7m).
- Caudales grandes.
- Tiempos de residencia del líquido elevados.
- Más versatilidad y facilidad de modificación.
- Menor coste, en especial para caudales grandes.

Condiciones favorables para una columna de relleno o empacada:

- Diámetros de columna pequeños (<0.7m).
- Destilaciones a presión baja.
- Óptima para sustancias corrosivas o que generan mucha espuma.
- Pérdidas de carga pequeñas.

Debido a que trabajamos con ácidos y requerimos de la mayor eficacia posible de transferencia de materia, amén de trabajar a condiciones de corrosión importante, se decide trabajar con relleno.

Además, sabiendo que debido a pérdidas de carga y dificultades en la circulación del fluido, 0,1 m/s es la velocidad de circulación de un líquido a través de una columna, podemos estimar el diámetro quedando como:

$$A = 0.25 \pi \phi^2 \quad (\text{Ec. 11.2.2})$$

Así pues, el diámetro estimado es: $\phi \approx 0.25 \text{ m}$

Siendo así, nuestra selección será una columna de relleno.

SELECCIÓN DEL TIPO DE FLUJO EN LA COLUMNA:

En una operación de absorción, se puede operar co-corriente o contracorriente, y el objetivo de una operación u otra reside en maximizar la transferencia de materia entre fases minimizando los costes, así pues, sin necesidad de hacer calculo alguno, siguiendo los consejos del autor Wankat, 2007, y del propio software Aspen Plus, decidimos operar contracorriente, entrando el corriente 108 justo encima del primer plato teórico, y el corriente 209 por debajo del último. (Ver figura 11.2.4 para el modelo de flujo)

SELECCIÓN DEL TIPO DE RELLENO:

Para maximizar el área de contacto entre fluidos, minimizar la resistencia al flujo de gas, tener una distribución uniforme del líquido sin caminos preferenciales a través de la columna y promover el flujo uniforme de gas a través de la sección de la columna, se pueden escoger fundamentalmente dos tipos de rellenos: Los uniformes y los aleatorios.

Los uniformes son útiles para velocidades de gas elevadas tales como torres de refrigeración, debido a que suelen ser estructuras abiertas tienen poca pérdida de presión. También son una buena elección si el diámetro de la columna es mayor de 0.7 m y se ha decidido instalar una columna de relleno ya que este tipo de relleno se construye con el diámetro preestablecido por módulos y su coste relativo disminuye cuanto mayor es el diámetro.

Los aleatorios son los más usados en la industria, debido a que ofrecen mayores coeficientes de transferencia de materia a cambio de tener mayores pérdidas de carga. Además, su precio es inferior que el ordenado para cantidades pequeñas, si se requieren volúmenes muy elevados, su ventaja se reduce por los motivos comentados. Para nuestro caso, usaremos el relleno (aleatorio): Flexirings (Glitsch)-Inox 2”.

RESULTADOS DE LA COLUMNA:

El resultado final del valor de caudal de agua necesaria para conseguir refrigerar el corriente de proceso suficiente, pero sin absorber de más acrilonitrilo amén de cumplir el valor mínimo de agua para tener nuestro sulfato de amonio disuelto y por tanto, evitar problemas de incrustaciones en la columna se puede observar en la tabla 11.2.63. Como vemos pues en esta tabla, el valor final es poco más del doble del calculado en primera instancia, esto se debe pues a que de las dos condiciones impuestas, la más restrictiva era el cumplir con la solubilidad del sulfato y no el refrigerar el corriente de gas, a esto se debe añadir que nuestro cálculo riguroso incluye las imperfecciones del relleno, así pues, en nuestro cálculo de idealidad, aún faltaba por añadir las posibles desviaciones por no tener un contacto ideal entre fases. En la siguiente tabla, se muestra pues los resultados obtenidos en el simulador Aspen Plus para esta unidad de absorción:

Tabla 11.2.68.- Resultados obtenidos del simulador Aspen Plus

Diámetro (m)	0,383
Número de etapas	12
HETP (m)	0,5
Presión de diseño (bar)	1
ΔP por sección (mBar/m)	6,20
ΔP total (bar)	0,0372

Siendo pues el diámetro similar al estimado, se comprueba que la selección del tipo de relleno en la columna es correcta.

DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA:**A. Cálculo del espesor de la pared de la columna**

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 71,67°C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_P = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11.2.5})$$

$$T_P = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11.2.6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot). Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_P \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_P} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.69.- Datos para el cálculo del espesor

P proyecto (bar)	1,11
Dint (mm)	383
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (bar)	1082,48
e (mm)	0,232

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2\text{mm}) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3\text{mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopfer ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.10})$$

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

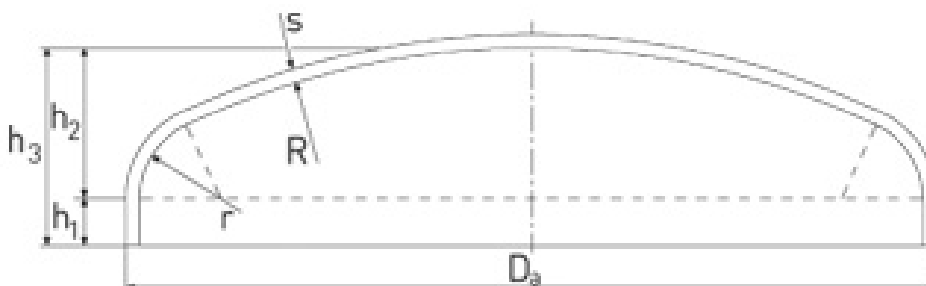


Figura 11.2.50.- Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11.2.11})$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.70.- Datos obtenidos para el cabezal

R(mm)	389
r(mm)	38,9
h1(mm)	10,5
h2(mm)	73,907
h3(mm)	84,407

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11.2.12})$$

$$V_i = 0,0124 \text{ m}^3$$

$$V_e = 0,0128 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,0004 \text{ m}^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$\text{Presión}_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.2.13})$$

$$\text{Presión}_{fondo} = 1,932 \text{ bar}$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.71.- Datos obtenidos para el fondo

t (mm)	3
Da (mm)	389
h3(mm)	84,406
Vpared (m³)	0,0004

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$Altura\ total = L + A\ cabezal + A\ fondo + 2 \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

En la columna a la altura del relleno (L) se le suma un espacio para los equipos internos de la columna, los conductos (tubos) para introducir los fluidos y para poder ejercer la mano de obra (limpieza del distribuidor, introducción del relleno aleatorio...) En este caso se suman 2 metros.

$$Altura_{total} = 6 + 0,084 + 0,084 + 2$$

$$Altura_{total} = 8,169m$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11.2.15})$$

$$Area_{lateral} = 9,777\ m^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacio

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal}$$

$$+ \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times espesor \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal y fondo} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna vacia} = 240,613 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de liquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{icabezal} + V_{ifondo} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$Peso \text{ del agua} = 945,663 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del liquido} = 925,799 \text{ kg}$$

Para calcular el peso de la columna llena se necesita conocer el peso del relleno utilizado que se coge de los datos del Aspen.

$$Peso \text{ del relleno} = 2084,181 \text{ kg}$$

$$Peso_{columna llena} =$$

$$Peso \text{ de la columna vacia} + Peso_{liquido} + peso_{del relleno} \quad (\text{Ec. 11.2.20})$$

$$Peso \text{ de la columna llena agua} = 3270,458 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ de la columna llena liquido} = 3250,593 \text{ kg}$$

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor optimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior del quench se coge la de proyecto.

11. Manual de cálculo

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C, una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de 0,5 m/s. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda. Todos estos datos se muestran en la figura 11.2.51 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.2.72.

Figura 11.2.51.- Datos seleccionados para el aislante.

Tabla 11.2.72.- Espesores recomendados de aislante

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	46,83	12,7	78,19
Superficie plana vertical	49,88	12,7	75,03
Superficie plana horizontal Cara abajo	55,46	12,7	69,88

A continuación mostraremos una tabla con los parámetros más destacados de la columna, pero el resultado exhaustivo se puede ver en la hoja de especificaciones:

Tabla 11.2.73.- Características físicas principales de la columna CA-302

Presión de diseño (Pa)	111500
Temperatura de diseño (°C)	220
HETP (m)	0,5
Número de etapas	12
Altura de lecho empacado (m)	6
Altura total (m)	8,169
Espesor de cabezales (mm)	3
Espesor del aislante (mm)	12,7
Peso total columna vacía (kg)	240,613
Peso columna en operación (kg)	3250,593
Peso columna con agua (kg)	3270,458
Diámetro del lecho (m)	0,383
Diámetro total columna (m)	0,389

EQUIPOS INTERNOS DE LA COLUMNA

❖ Relleno de la columna

Anteriormente ya fue explicado, que tipo de relleno se seleccionó y los motivos.

Los rellenos utilizados para esta columna de absorción son los Flexiring de la empresa Koch-glitsch, de material acero inoxidable y con unas dimensiones de 2 in.



Figura 11.2.52.- Relleno Flexiring de la empresa Koch-glitsch.

❖ Distribuidor de líquido

La distribución del líquido probablemente es la parte más importante en una operación eficiente de una torre de relleno. Un buen relleno, desde el punto de vista del proceso, puede ser reducido en su eficacia por la mala distribución del líquido.

La elección final del mecanismo de distribución del líquido a través del relleno depende del tamaño de la torre, tipo de relleno, tendencia del relleno a desviar el líquido a las paredes de la torre y materiales de construcción. (Ludwig, 2001).

Table 9-18
Guidelines for Selection of Liquid Distributors

Factor	Type of Distributor					
	PAN (RTD)	POH (Gravity)	POH (Pressure)	NTD	SNH	VND
Uniformity	VG	VG	F	VG	P	P
Solids handling	P	P	F	G	G	VG
Turndown	G	G	G	G	P	P
Ease of installation	F	F	G	F	VG	G
Ease of leveling	F	G	VG	F	VG	F
As redistributor	G ^{1,2}	No ²	No	No ²	No	No ²
Height requirement	M	L	VL	H	M	H
Cost	H	M	L	H	L	M
Residence time	H	L	L	M	L	M
Suitable for large diameters (>10 ft)	P	G	G	G	VG	G
Leakage potential	H ³	No	No	No	No	No
At high vapor rates	P	G	G	G	VG	G
At high liquid rates	G	G	G	G	VG	G
At low liquid rates	G	VG	G	VG	P	P
For high-purity fractionation	VG	VG	P	VG	P	P
Heat transfer	G	G	F	G	VG	G
Liquid feed handling	Yes ¹	No	No	Yes	No	Yes
Flashing feed handling	Yes ^{1,2}	No ²	No	No ²	No	No ²

Key: VG = very good; G = good; F = fair; P = poor; H = high; M = moderate; L = low; and VL = very low. "No" means that the distributor cannot be used for the particular factor.

Tabla 11.2.53.- Directrices para la selección de distribuidores de líquido

- Distribuidores PAN

Estos consisten en una bandeja plana con orificios espaciados uniformemente para permitir el flujo del líquido en el relleno. Esta bandeja tiene canales de vapor, uniformemente espaciados, pero sin interferir con los orificios de líquido. Estos son utilizados para limpiar líquidos en torres de diámetro de 2 a 10 ft. Se puede instalar entre bridas en Torres menores de 2 ft.

Cuando el flujo de vapor y líquido son elevados, la eficiencia de separación del sistema puede que no sea buena cuando sólo puedan instalarse 4 a 6 puntos de goteo por ft^2 debido al espacio ocupado en la bandeja por los grandes canales de vapor.

Para altos flujos de vapor el diseño debe ser cuidadosamente evaluado. Para un rendimiento del agujero uniforme todos los orificios deben ser perforados en la misma dirección, es decir, de arriba a abajo o de abajo hacia arriba.

El uso de distribuidores de PAN es una buena elección para torres de diámetro de 3-9 ft y más grande. (Ludwig, 2001).

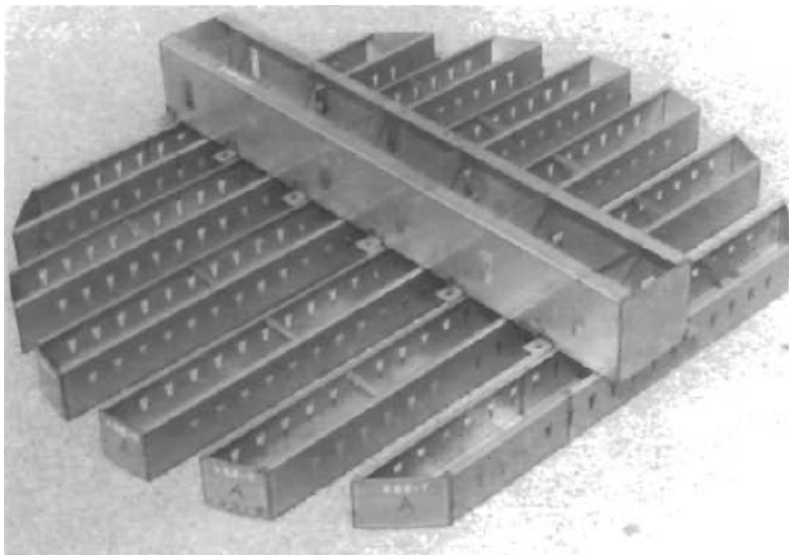


Figura 11.2.54.- Distribuidor de tipo PAN.

- Distribuidores de depresión (*Trough Distributors, NTD*)

Estos consisten en varios bebederos de 3 o 4 pulg de ancho que son alimentados por una caja o parting montada por encima. La caja de alimentación distribuye el líquido para los bebederos a través de orificios calibrados en la parte inferior o pared. Los puntos de salida de los bebederos para el relleno se encuentran normalmente en la inferior o en la pared de los bebederos.

Estos bebederos pueden redistribuirse fácilmente a través de una torre. Los NTD se utilizan muy a menudo con relleno estructurado.

Con un distribuidor de depresión (Trough Distributors) es más difícil obtener una distribución uniforme junto a la pared de la torre que con un distribuidor PAN o de tubería con orificio. El uso de muescas (VND) en las paredes para la salida del flujo es más sensible a los problemas que el otro diseño, y para el mismo nivel de tolerancia produce una distribución no uniforme del flujo más severa. La calidad de la distribución de unas muescas V es pobre en comparación con la de los otros tipos de distribuidor de depresión, pero tienen ventajas en los sistemas de lodos. No debe utilizarse para aplicaciones de destilación crítica, pero es bueno para la transferencia de calor y en sistemas que contienen sólidos. (Ludwig, 2001).

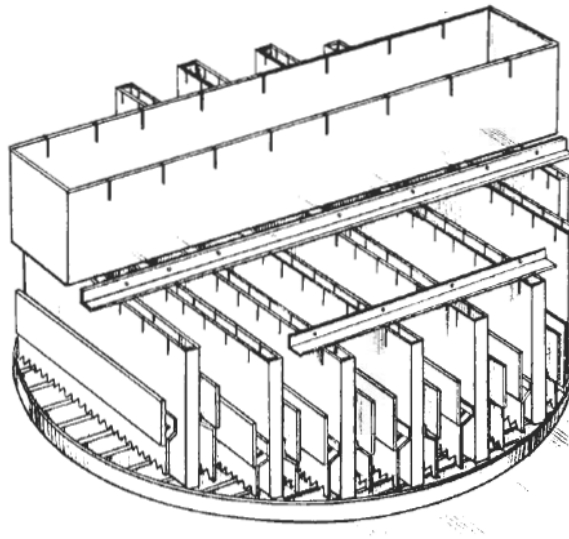


Figura 11.2.55.- Distribuidor de depresión (Trough Distributors, NTD)

- Distribuidores de tubos de orificios encabezados (Pipe orifice Headers (POH))

Estos distribuidores son fabricados de longitudes de tubería ligadas a un encabezado de distribución central (normalmente) con agujeros de orificio perforados en la parte inferior de los laterales de tubería fuera del encabezado. Este estilo de distribuidor puede ser alimentado por presión o gravedad para los fluidos limpios.

La alimentación por gravedad se considera mejor para aplicaciones de destilación críticas cuando la uniformidad del flujo de los puntos de goteo (flow points) a través de la salida del corte transversal de la torre es extremadamente importante, y es

excelente para requerimientos de bajo flujo como por debajo de 10 gpm/ft.2. (Ludwig, 2001).

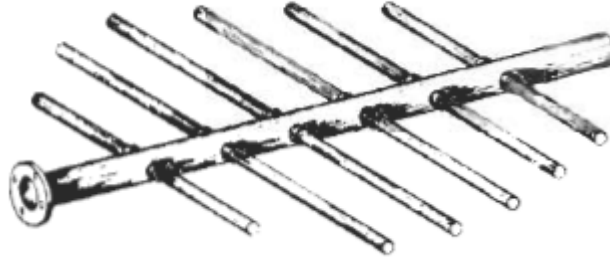


Figura 11.2.56.- Distribuidor de tubo de orificios encabezados (Pipe orifice Headers (POH))

- Distribuidores de boquilla de pulverización Spray Nozzle Headers (SNH)

Estos son similares en diseño que el distribuidor de orificio de tubería usando ángulos pequeños (ir) de boquillas de pulverizar en lugar de orificios. Debido a que los sprays pueden ser seleccionados para cubrir diferentes secciones transversales, el número total puede ser pequeño comparado con el orificios que se necesitaría. La boquilla del spray debe ser "completo cono" y no "cono hueco" para proporcionar un círculo de líquido uniforme que debe superponerse para evitar puntos secos.

Es necesario un cuidadoso diseño para evaluar cuánto líquido fluye a través de cada pie cuadrado de la torre y por lo tanto en el relleno. Este estilo de distribuidor es bueno para la transferencia de calor y lavado de vapor, con poco o no fraccionamiento, aunque se han utilizado con éxito para las operaciones de destilación (Ludwig, 2001).

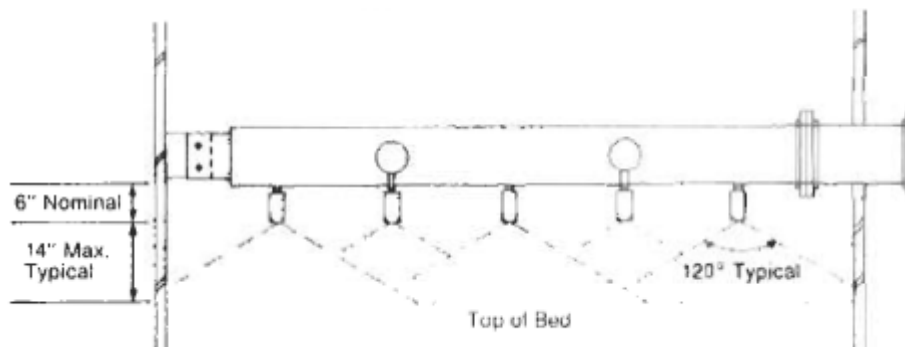


Figura 11.2.57.-Distribuidores de boquilla de pulverización Spray Nozzle Headers (SNH)

Teniendo en cuenta todo lo escrito anteriormente y las características del relleno, torre y flujo que se trabaja se selecciona el tipo de distribuidor. El relleno es aleatorio (Flexiring-glitsch) por lo que ya sería razonable descartar los distribuidores NTD,VND ya que usualmente se usan para los estructurados.

Estudiando todas las posibilidades el tipo de distribuidor seleccionado es el distribuidor tipo PAN. Como el material que usamos es acero inoxidable el diámetro mínimo de orificio recomendado es 0,1875 in. Como el tamaño del relleno usado es 2 in que es un tamaño medio, el número de puntos de goteo por ft^2 (Drip Points/ Ft^2) es de 6-8. El distribuidor elegido es el de la empresa rvt Process Equipment.

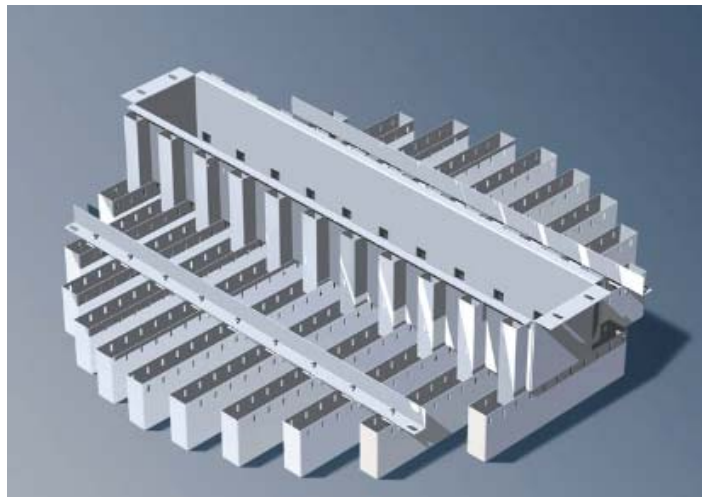


Figura 11.2.58.- Distribuidores tipo PAN de la empresa rvt Process Equipment.

❖ Soporte de rellenos

El propósito principal de un soporte de relleno es mantener el lecho de relleno sin restricción excesiva de flujo de gas y de líquido, pero sirve también para distribuir ambas corrientes. Si la placa de soporte no se diseña cuidadosamente, puede causar inundaciones de columna prematura. Por lo tanto, el diseño de la placa de soporte afecta considerablemente a la caída de presión de la columna y al rango estable de operación.

Pueden utilizarse dos tipos básicos de placas de soporte:

1. Contracorriente.

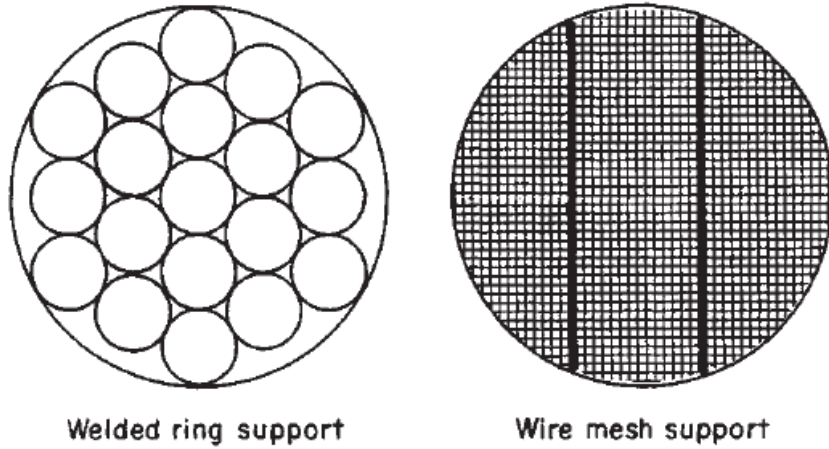


Figura 11.2.59.- Soporte de relleno tipo contracorriente.

2. Pasajes de flujo separados para líquido y gas

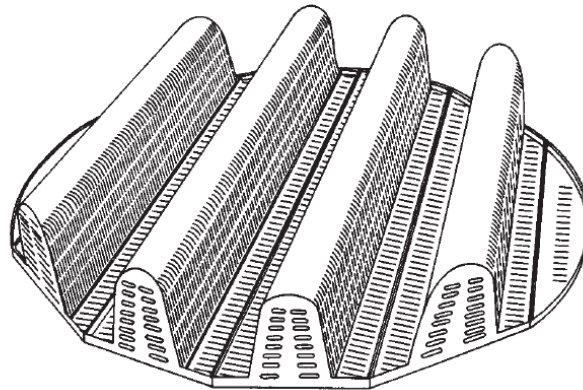


Figura 11.2.60.- Soporte de relleno tipo biga, inyección de gas.

El grado de espacio abierto en un plato de soporte es la fracción de vacío inherente en el diseño de la placa menos la parte de la zona abierta tapada por el relleno. Para evitar inundaciones prematuras, el área neta abierta de la placa debe ser mayor que el propio relleno (Perry, 1996). Dado el tamaño de la columna y para un buen aguante del relleno y distribución de gas y líquido, el soporte que se selecciona es el soporte de relleno con pasajes de flujo separados líquido y gas.

El soporte elegido es el TS804 Random Packing gas-injection support de la empresa Koch-glitsch.

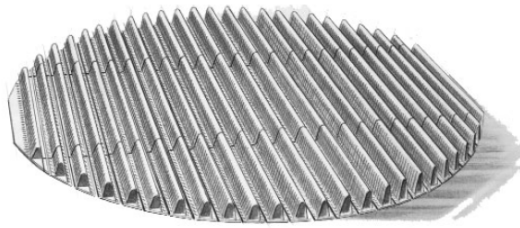


Figura 11.2.61.- Soporte TS804 Random Packing gas-injection support de la empresa Koch-glitsch.

❖ Redistribuidor

El líquido bajando por el relleno y el muro de la torre debería redistribuirse después de sección. Esta redistribución recoge el líquido de las paredes de la torre y lo dirige hacia el centro de zona de la torre para un nuevo comienzo en distribución y contacto en la siguiente sección inferior. El redistribuidor debe ser sellado contra la pared de la torre para recoger todo el líquido que baja de la sección anterior de relleno. A continuación, debe ser capaz él solo o en combinación con un distribuidor colocado debajo de redistribuir el líquido de manera eficiente. La altura del relleno antes de la redistribución es una función del patrón de flujo de líquido a través del relleno, y esta es una función del tamaño y el tipo de relleno. Algunas torres tienen 20-30 ft de relleno sin ninguna redistribución; sin embargo, las razones pueden ser económicas y no operacionales (Ludwig, 2001).

- Wall Wipers or Side Wipers

Este tipo de redistribuidores/ colectores son más útiles para reducir los efectos de la elusión de líquido corriendo por las paredes en torres pequeñas. Para grandes diámetros de 4 ft y mayor, no son tan útiles porque recogen una menor cantidad del líquido total de la torre y no pueden redistribuirlo a lo largo de la sección transversal de la torre.

Este tipo es mejor para diámetros de torre de 18 in, 20 in o 30 in.



Figura 11.2.62.- Redistribuidor "Rosette" Tipo Wall Wipers.

- Hold-down Grids

Estas rejillas se usan cuando las condiciones de flujo y las características del relleno pueden ser tales que el empacado puede desplazarse. Las oberturas en los —hold down plates tienen que ser lo suficientemente pequeñas para retener el relleno, pero tanto como para restringir el paso del vapor o del líquido. Los Hold-down Grids descansan directamente sobre el relleno, y los limitadores de relleno aunque son similares en diseño, generalmente son de menor peso y deben ser atornillados a la pared de la columna por encima del relleno. (Ludwig,2001)



Figura 11.2.63.- Redistribuidor Tipo Hold-down Grids.

Para anillos Flexiring los requerimientos de redistribución son mucho menos exigentes que para otros rellenos. La frecuencia de redistribución depende del tamaño del relleno, régimen del líquido, diámetro de la columna, etc. pero generalmente no resulta económico redistribuir más que cada 3 metros. Por lo general dan resultados satisfactorios en alturas de lechos de 5 y 6 metros siendo este último valor un límite práctico máximo. El redistribuidor seleccionado es el de tipo Hold-down Grids, y como esta torre es de 6 m de lecho, se hacen dos secciones de 3 m cada una y se coloca un redistribuidor.

❖ Entrada gas

El gas entra por la parte inferior de la columna, no necesita distribuidor, simplemente una placa colocada por el interior de la columna para impedir que el líquido al caer perturbe la entrada de gas.

❖ Colocación de los equipos internos de la columna

Para las columnas de relleno aleatorio, en la parte superior de la columna se coloca un agujero de hombre (lo mínimo para que entren dos brazos de una persona) para poder introducir el relleno aleatoriamente y poder limpiar el distribuidor. En la parte inferior de la torre, en la entrada de gas, se coloca una placa para que el líquido que desciende no entorpezca la entrada de gas.

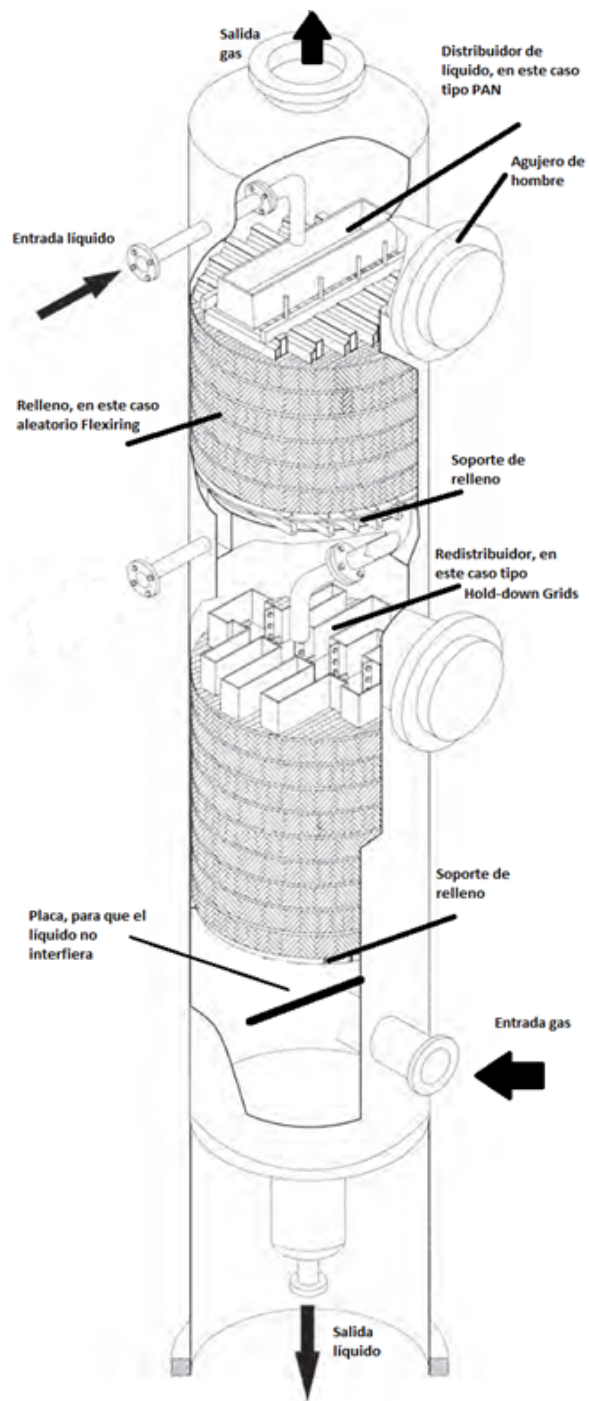


Figura 11.2.64.- Columna de relleno Flexiring .

11.2.5.- Columna flash (CF-301)

Este tanque flash se estima oportuno para minimizar el caudal de entrada a la torre de absorción y así ahorrar la cantidad de agua necesaria a aportar en esta operación, además de reducir las dimensiones de dicho equipo. Así pues, este tanque se dimensionará según los estándares descritos en la bibliografía (Manning, Francis S., Thompson, Richard E.; 1993).

Primero se calcula Kv:

$$abscisa = \frac{W_l}{W_v} \cdot \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}} \quad (\text{Ec. 11.2.25})$$

-W_l, W_v: caudal másico de líquido y gas respectivamente (kg/h)

- ρ_l, ρ_v: densidades del líquido y el gas respectivamente (kg/m³)

Ahora, leemos en la siguiente figura extraída de la literatura citada:

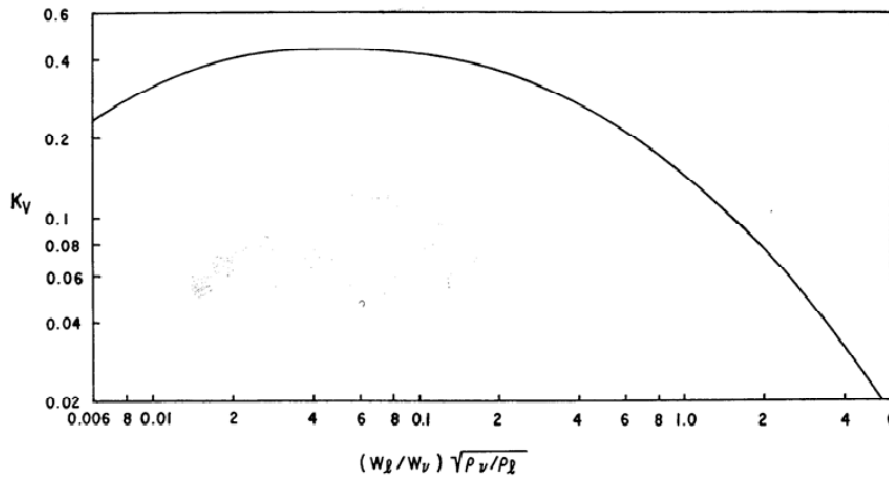


Figura 11.2.65.- Gráfico con valores de Kv vs. Propiedades de los fluidos.

Así, siendo según la ecuación Ec.11.2.151 el valor de abscisas:

$$abscisa = \frac{W_l}{W_v} \cdot \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}} = \frac{17428,61 \left(\frac{kg}{h}\right)}{66537,72 \left(\frac{kg}{h}\right)} \sqrt{\frac{1,246 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{961,572 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}} = 0.00943$$

Y para este valor, corresponde un Kv por la figura 11.40: Kv=0.32 m/s.

Ahora, según la ecuación de Souders-Brown:

$$v_{max} = Kv \cdot \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v}} \quad (\text{Ec. 11. 2. 26})$$

Así pues, se obtiene:

$$v_{max} = 8,884 \text{ m/s}$$

Se aplica la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q_{vap}}{v_{max}} \quad (\text{Ec. 11. 2. 27})$$

Con el área (1.70 m²), que aplicando la ecuación (Ec.11.2.2), se obtiene:

$$\phi = 1.458 \text{ m}$$

Que para trabajar con medidas convencionales, aproximaremos a 1,50 m². Para determinar la altura del recipiente nos basamos en los datos extraídos de la misma bibliografía donde recomiendan:

Tabla 11.2.74- Datos bibliográficos sobre relaciones Longitud/diámetro:

Presión de operación (bar)	Relación L/D
0-17,25	3
17,26-34,5	4
>34,5	5

Así pues, estando en el primer rango, tenemos una relación de 3. Por tanto, nuestras dimensiones serán:

Tabla 11.2.75.- Dimensiones finales del equipo:

Diámetro (m)	1,5
Altura (m)	4,5

11.2.5.1.- Diseño mecánico del equipo:

Este equipo trabaja a una presión y temperatura de diseño:

Tabla 112.76.- Condiciones de diseño del recipiente

Temperatura (°C)	20
Presión (bar)	1,01

A. Cálculo del espesor de la pared de la columna

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985.)

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 20 °C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_p = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11.2.5})$$

$$T_p = T_{operación} + 20^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 11.2.6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.77.- Datos para el cálculo del espesor

P proyecto (Pa)	101000
Dint (mm)	1500
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (Pa)	108248000
e (mm)	0,906

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11.2.8)}$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 4 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \text{ (Ec. 11.2.9)}$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna sale un espesor mínimo (t_{min}) de 1,2 mm, si el espesor calculado es mayor a este valor la fórmula utilizada es la correcta.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$\text{espesor del cabezal (t)} = 1,5 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

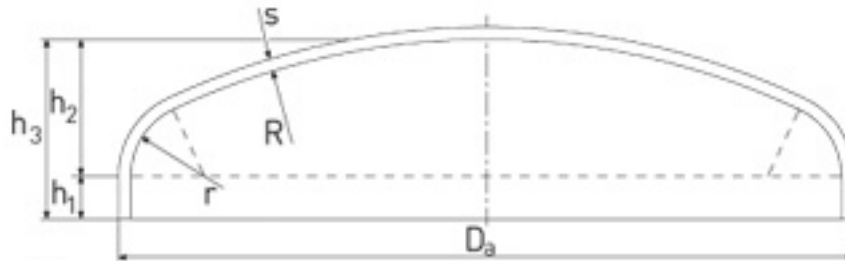


Figura 11.2.66.- Cabezal toriesférico.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11. 2. 11})$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.2.78.- Datos obtenidos para el cabezal

R(mm)	1510
r(mm)	151
h1(mm)	17,5
h2(mm)	289,91
h3(mm)	307,41

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell, E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11. 2. 12})$$

$$V_i = 0,190m^3$$

11. Manual de cálculo

$$V_e = 0,193m^3$$

$$V_{pared} = 0,003 m^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$Presión_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11. 2. 13})$$

$$Presión_{fondo} = 153500 Pa$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.2.79.- Datos obtenidos para el fondo

t (mm)	4
Da (mm)	1508
h3(mm)	303,978
Vpared (m³)	0,003

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$Altura_{total} = L + A_{cabezal} + A_{fondo} \quad (\text{Ec. 11. 2. 14})$$

$$Altura_{total} = 4,5 + 0,303 + 0,307$$

$$Altura_{total} = 5,111 m$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11. 2. 15})$$

$$Area_{lateral} = 21,319 m^2$$

E. Cálculo del peso de la columna vacía

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacío

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times \text{espesor} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal \text{ y fondo}} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna \text{ vacía}} = 717,994 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso de la columna llena

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de líquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i \text{ cabezal}} + V_{i \text{ fondo}} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$Peso \text{ del agua} = 8325,680 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del líquido} = 8012,936 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ columna llena} = \text{Peso de la columna vacía} + \text{Peso líquido} \quad (\text{Ec. 11.2.20})$$

$$Peso \text{ de la columna llena agua} = 9043,674 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ de la columna llena líquido} = 8730,930 \text{ kg}$$

Como la columna no está a una temperatura elevada no es necesario poner aislamiento.

11.3.- SEPARADOR DE FASES DE LA COLUMNA (CD-601)

Para diseñar el separador se sigue el método de Hooper y Jacobs que se especifica a continuación (bibliografía: Ludwig, 1983):

$$u_d = \frac{d_d^2 \cdot g \cdot (\rho_d - \rho_c)}{18 \cdot \mu_c} \quad (\text{Ec. 11.3.1})$$

Dónde:

d_d = diámetro de una gota = 150^{-6} m (Extraído de la bibliografía en concepto de diseño conservativo (Ludwig, 1983)

u_d = velocidad terminal de las gotas de la fase orgánica con diámetro d_d (m/s)

ρ_c = densidad fase acuosa (Kg/m^3)=938,22 Kg/m^3

ρ_d = densidad fase orgánica (Kg/m^3)=765,91 Kg/m^3

μ_c = viscosidad fase acuosa (Ns/m^2)= 0,00058016 Ns/m^2

g = aceleración gravitacional = 9.81 m/s^2

Así se obtiene de la ecuación Ec.11.3.1:

$$u_d=0,00364 \text{ m/s}$$

Ahora debemos calcular:

$$A_i = \frac{L_c}{u_c} \quad (\text{Ec. 11.3.2})$$

Dónde:

u_d = velocidad terminal de las gotas de la fase acuosa.

L_c =cabal volumétrico fase acuosa (m^3/s).

A_i =Área interfacial.

u_c = velocidad crítica terminal de las gotas de la fase acuosa.

Así pues, si en todo caso $u_c < u_d$, podemos suponer $u_c = u_d$ y para el caso tendremos un tanque ligeramente sobredimensionado. Rescribimos la ecuación Ec.11.3.2 como:

$$A_i = \frac{L_c}{u_d} \quad (\text{Ec. 11.3.3})$$

Se obtiene que:

$$A_i = 0,0699 \text{ m}^2$$

Y siendo la fórmula del área:

$$A = 0.25 \cdot \pi \cdot \phi^2 \quad (\text{Ec. 11.3.4})$$

$$\phi = 0.298 \text{ m}$$

Para calcular la altura, seguimos con el método de Hooper y Jacobs, el cual nos dice que por simple geometría, se diseña la altura del cilindro como:

$$h = 2 \cdot \phi \quad (\text{Ec. 11.3.5})$$

Así pues, será la altura del equipo:

$$h = 2 \cdot 0.298 = 0.596 \text{ m}$$

Para comprobar que con estas dimensiones tendremos un buen coeficiente de reparto, se calcula el tiempo de residencia de la interfase y comprobamos que este valor este dentro del rango de operación recomendado, y esto lo se calcula como:

$$h_{\text{fase dispersa}} = 0,10 \cdot h \quad (\text{Ec. 11.3.6})$$

$$t_{\text{residencia interfase}} = h_{\text{fase dispersa}}/u_d \quad (\text{Ec. 11.3.7})$$

Así, de las ecuaciones Ec.11.3.6 y Ec.11.3.7, tenemos que el tiempo de residencia para nuestra interfase es:

$$t_{\text{residencia interfase}} = 16s$$

Y en la bibliografía nos recomiendan valores de entre 60 y 300 segundos, así pues, vemos que este será el valor limitante de nuestro tanque, el cual deberemos agrandar para hacer cumplir el suficiente tiempo de residencia.

Multiplicando por cuatro los valores iniciales, cumplimos estos valores por el rango inferior, y como ya se ha sido conservativos al escoger el diámetro de burbuja y con la velocidad crítica, damos por bueno el equipo con unas dimensiones finales:

Tabla 11.3.1.- Datos calculados para el separador de fases inmiscibles T-601

Diámetro (m)	0,528
Altura (m)	1,584

11.3.1- Diseño mecánico del equipo:

Este equipo trabaja a una presión y temperatura de diseño:

Tabla 11.3.2- Condiciones de diseño del recipiente

Temperatura (°C)	46,7
Presión (bar)	0,4

A. Cálculo del espesor de la pared del tanque

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 46,7C, y la presión de operación que es 1 bar.

$$P_p = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11.2.5})$$

$$T_p = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11.2.6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.7})$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.3.3.- Datos para el cálculo del espesor

P proyecto (Pa)	110000
Dint (mm)	528
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (bar)	108248000
e (mm)	0,316

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.8})$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 3 \text{ mm}$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$\text{espesor del cabezal } (t) = 3 \text{ mm}$$

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

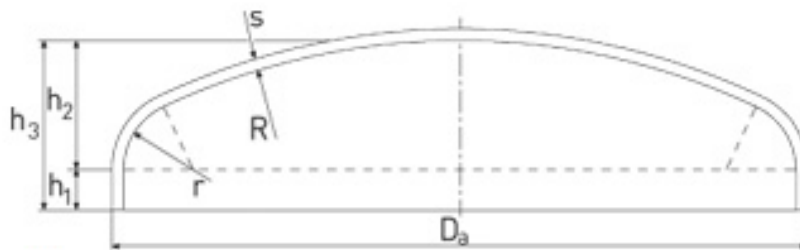


Figura 11.3.1.- Cabezal toriesférico.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (\text{Ec. 11. 2. 11})$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.3.4.- Datos obtenidos para el cabezal

R(mm)	534
r(mm)	53,4
h1(mm)	10,5
h2(mm)	101,964
h3(mm)	112,464

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11. 2. 12})$$

$$V_i = 0,0506 \text{ m}^3$$

$$V_e = 0,0514 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,0006 \text{ m}^3$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$\text{Presión}_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11. 2. 13})$$

$$\text{Presión}_{fondo} = 131300 \text{ Pa}$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.3.5.- Datos obtenidos para el fondo

t (mm)	3
Da (mm)	534
h3(mm)	112,464
Vpared (m^3)	0,0006

D. Cálculo de la altura total y superficie lateral de la columna

$$\text{Altura total} = L + A \text{ cabezal} + A \text{ fondo} \quad (\text{Ec. 11. 2. 14})$$

$$\text{Altura}_{total} = 1,584 + 0,112 + 0,112$$

$$\text{Altura}_{total} = 1,809 \text{ m}$$

$$\text{Area}_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11. 2. 15})$$

$$\text{Area}_{lateral} = 2,657 \text{ m}^2$$

E. Cálculo del peso del tanque vacío

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacío

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times \text{espesor} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal \text{ y fondo}} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

$$Peso_{columna \text{ vacía}} = 72,318 \text{ kg}$$

F. Cálculo del peso del tanque lleno

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de líquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{icabezal} + V_{ifondo} \right) \times \rho_{liq} \quad (\text{Ec. 11.2.19})$$

$$Peso \text{ del agua} = 393,683 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ del líquido} = 466,001 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ columna llena} = \text{Peso de la columna vacía} + \text{Peso líquido} \quad (\text{Ec. 11.2.20})$$

$$Peso \text{ de la columna llena agua} = 369,694 \text{ kg}$$

Peso de la columna llena liquido = 442,012 kg

G. Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es mantas aislantes de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C , una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de $0,5 \text{ m/s}$. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda. Todos estos datos se muestran en la figura 11.3.2 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.3.6.

Datos de Entrada	
Temperatura Interior:	66.7 °C
Temperatura Superficie Aislamiento:	45 °C
Temperatura Ambiente:	25 °C
Velocidad del Aire:	0.5 m/s
Superficie Exterior Aislamiento:	7
Código Material :	7
Emisividad:	0.13
Superficie Desnuda:	2
Código Material :	2
Emisividad:	0.3

Figura 11.3.2.- Datos seleccionados para el aislante.

Tabla 11.3.6.- Espesores recomendados de aislante

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	37,53	12,7	80,28
Superficie plana vertical	38,66	12,7	78,58
Superficie plana horizontal Cara abajo	39,64	12,7	77,94

11.4.-TANQUES DE PROCESO

11.4.1.- Tanques de separación de fases de las columnas

A pesar de que las columnas de rectificación convencionales no requieren de un separador de fases como es el caso de la columna CD-601, a la salida del condensador, y aunque toda la salida de este sea en fase líquida, se recomienda tener un pequeño tanque para o bien separar la fase líquida de la vapor (a modo de columna flash) o bien como simple acumulador de líquido. Esto sirve para evitar problemas de separación de fases (cuando se da el caso) y además para acumular cierta cantidad de fluido y así asegurar una entrada constante de líquido como reflujo de la columna y asegurar su correcto funcionamiento, ya que si la salida del condensador fuera directa mediante una división simple con el caudal correspondiente a la columna, se podría ver gravemente alterado el funcionamiento de la columna delante de perturbaciones en el condensador.

11.4.1.1.- Tanques para columnas:

Así pues los tanques a dimensionar son: T-301, T-302, T-501, T-502, T-602 y T-701. Cabe recordar que el tanque T-601 ya está dimensionado en el apartado 11.2.4 debido a su especial caso, los demás casos debido a que no requieren de una separación de fases, su función solo es de tanque pulmón, así pues, y buscando en la bibliografía valores típicos, encontramos que 30 segundos de tiempo de residencia puede ser

suficiente para asegurarnos los objetivos ya definidos. Así pues, el esquema de diseño para ambos casos será:

$$Volumen = Q_{salida\ condensador} \cdot \tau \quad (\text{Ec. 11.4.1})$$

$$L = 3 \cdot \phi \quad (\text{ver tabla 11.33}) \quad (\text{Ec. 11.4.2})$$

$$\phi = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Vol.}{3 \cdot \pi}} \quad (\text{Ec. 11.4.2})$$

Dónde:

τ =Tiempo de residencia (s)

Q=Caudal de salida de condensador (m³/s)

ϕ =Diámetro (m)

Así pues, de las ecuaciones Ec.11.4.1, Ec.11.4.2 y Ec.11.4.2, tenemos que las dimensiones para estos equipos son:

Tabla 11.4.1.- Dimensiones de los tanques:

Tanques	T-301	T-302	T-602	T-501	T-502	T-701
Diámetro (m)	0,678	0,346	0,489	0,302	0,309	0,352
Altura (m)	2,034	1,039	1,468	0,907	0,926	1,056

DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO:

A. Cálculo del espesor de la pared de la columna

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna, y la presión de operación.

$$P_P = P_{operación} \times 1,1 \quad (\text{Ec. 11. 2. 5})$$

$$T_P = T_{operación} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 11. 2. 6})$$

El material elegido para la carcasa es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (—X—ray spot[®]).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_P \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_P} \quad (\text{Ec. 11. 2. 7})$$

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2\text{mm}) \quad (\text{Ec. 11. 2. 8})$$

B. Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_P \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_P} \quad (\text{Ec. 11. 4. 9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno de la columna.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

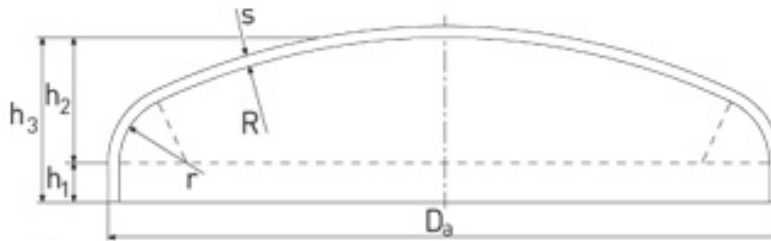


Figura 11.4.1- Cabezal toriesférico.

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \text{ (Ec. 11. 2. 11)}$$

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \text{ (Ec. 11. 2. 12)}$$

C. Cálculo del espesor del fondo de la columna

Para poder calcular el espesor en el fondo de la columna, primero hay que calcular la presión en este punto.

$$Presión_{fondo} = (\rho \times g \times h) + P_p \quad (\text{Ec. 11.3.13})$$

Con esto ya se puede calcular el espesor para un cabezal toriesférico, del mismo modo que en el caso anterior.

D. Cálculo de la altura total

$$Altura\ total = L + A\ cabezal + A\ fondo \quad (\text{Ec. 11.2.14})$$

E. Cálculo del peso del tanque vacío

Para el cálculo del peso de la torre vacía hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

Peso columna vacío

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + \text{Peso cabezal} \\ + \text{Peso fondo} \quad (\text{Ec. 11.2.16})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{lateral} \times espesor \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.17})$$

$$Peso_{cabezal\ y\ fondo} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11.2.18})$$

F. Cálculo del peso del tanque lleno

Se calcula el peso de la columna de absorción llena de agua y de fluido. Para el segundo caso se supone que el cuerpo cilíndrico de la columna está lleno del líquido que sale por el fondo de la torre durante la operación de la misma.

peso de liquido que llena la torre

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i\text{cabezal}} + V_{i\text{fondo}} \right) \times \rho_{liq} \text{ (Ec. 11. 2. 19)}$$

Peso columna llena = Peso de la columna vacía + Peso liquido (Ec. 11. 2. 20)

A continuación se muestran los datos obtenidos para los tanques T-301, T-302, T-501, T-502 y T-701.

Tabla 11.4.2.- Datos para el tanque T-301

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	3
Espesor cabezal toriesférico (mm)	3
Espesor fondo (mm)	3
Altura total (m)	2,317
Peso columna vacía (kg)	115,824
Peso agua que llena la columna (kg)	811,459
Peso columna llena de agua (kg)	927,283
Peso liquido que llena la columna (kg)	621,281
Peso columna llena de liquido (kg)	737,105

Tabla 11.4.3.- Datos para el tanque T-302

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	3
Espesor cabezal toriesférico (mm)	3
Espesor fondo (mm)	3
Altura total (m)	1,193
Peso columna vacía (kg)	33,207
Peso agua que llena la columna (kg)	117,859
Peso columna llena de agua (kg)	151,066
Peso liquido que llena la columna (kg)	2,588
Peso columna llena de liquido (kg)	35,795

Tabla 11.4.4.- Datos para el tanque T-501

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	4
Espesor cabezal toriesférico (mm)	4
Espesor fondo (mm)	4
Altura total (m)	1,051
Peso columna vacía (kg)	34,856
Peso agua que llena la columna (kg)	80,342
Peso columna llena de agua (kg)	115,198
Peso liquido que llena la columna (kg)	0,669
Peso columna llena de liquido (kg)	35,524

Tabla 11.4.5.- Datos para el tanque T-502

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	3
Espesor cabezal toriesférico (mm)	3
Espesor fondo (mm)	3
Altura total (m)	1,066
Peso columna vacía (kg)	27,031
Peso agua que llena la columna (kg)	85,533
Peso columna llena de agua (kg)	112,565
Peso fluido que llena la columna (kg)	0,096
Peso columna llena de fluido (kg)	27,128

Tabla 11.4.6.- Datos para el tanque T-602

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	3
Espesor cabezal toriesférico (mm)	3
Espesor fondo (mm)	3
Altura total (m)	1,678
Peso columna vacía (kg)	62,709
Peso agua que llena la columna (kg)	315,907
Peso columna llena de agua (kg)	378,616
Peso líquido que llena la columna (kg)	243,880
Peso columna llena de líquido (kg)	306,588

Tabla 11.4.7.- Datos para el tanque T-701

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	3
Espesor cabezal toriesférico (mm)	3
Espesor fondo (mm)	3
Altura total (m)	1,213
Peso columna vacía (kg)	34,233
Peso agua que llena la columna (kg)	123,635
Peso columna llena de agua (kg)	157,867
Peso líquido que llena la columna (kg)	97,264
Peso columna llena de líquido (kg)	131,497

11.4.2.- Tanques pulmón para aguas residuales:

Para no bombear cantidades tan pequeñas de líquido, lo cual nos supondría un sobrecoste por lo especial de las tuberías, accesorios y bombas, se añadirán dos tanques pulmón a la salida de las columnas finales donde se tienen caudales de agua residual a tratar por una empresa externa como son la columna CD-502 y CD-602. Así pues, usaremos esos tanques para almacenar cierta cantidad de desecho, y una vez lleno realizaremos un vaciado periódico, lo cual permitirá los ahorros ya mencionados.

El proceso de cálculo será el mismo que el seguido para los tanques para columnas, pero por decidir una cantidad no excesiva y que tengamos un tanque de medidas comerciales, se decide construir dos tanques de 1 m^3 . Así pues, fijado el volumen, con las ecuaciones 11.3.2 y 11.3.3 se obtiene unos tanques de dimensiones:

Tabla 11.4.8.- Dimensiones de los tanques:

Tanques	T-503	T-603
Diámetro (m)	0,752	0,752
Altura (m)	2,255	2,255

11.4.2.1.- Diseño mecánico del equipo:

El cálculo de los espesores para estos tanques se hace de la misma forma que los tanques explicados anteriormente.

Tabla 11.4.9.- Datos para el tanque pulmón T-503

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	3
Espesor cabezal toriesférico (mm)	3
Espesor fondo (mm)	3
Altura total (m)	2,567
Peso columna vacía (kg)	140,975
Peso agua que llena la columna (kg)	1096,326
Peso columna llena de agua (kg)	1237,301
Peso liquido que llena la columna (kg)	813,512
Peso columna llena de liquido (kg)	954,487

Tabla 11.4.10.- Datos para el tanque pulmón T-603

Espesor carcasa cilíndrica (mm)	3
Espesor cabezal toriesférico (mm)	3
Espesor fondo (mm)	3
Altura total (m)	2,567
Peso columna vacía (kg)	140,975
Peso agua que llena la columna (kg)	1096,326
Peso columna llena de agua (kg)	1237,301
Peso liquido que llena la columna (kg)	846,360
Peso columna llena de liquido (kg)	987,335

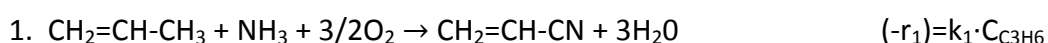
11.5.- REACTOR (R-201, R-202)

A continuación se detalla el diseño del reactor. En primer lugar se explican las generalidades del proceso: las reacciones químicas implicadas, el catalizador y el tipo de reactor. Seguidamente se presenta el modelo usado para el dimensionamiento, el sistema de intercambio de calor del sistema y los ciclones para la recuperación del catalizador.

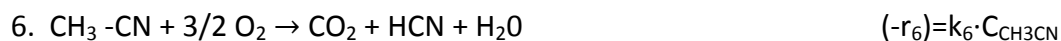
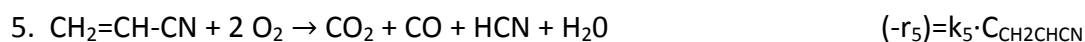
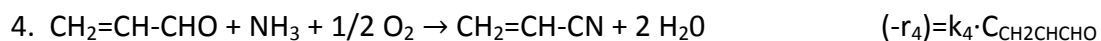
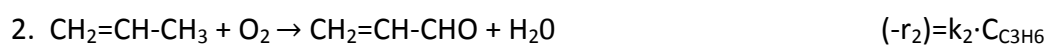
11.5.1.- Esquema de reacción

El acrilonitrilo se obtiene a partir de la oxidación catalítica en fase gaseosa del aire, propileno y amoníaco, en el que se conoce como proceso Sohio. En la bibliografía consultada se ha observado que hay pequeñas diferencias entre los diversos sistemas de reacciones propuestos y en los grados de conversión obtenidos. Aunque se han encontrado patentes y artículos que hablaban de conversiones de propileno del 98% (A. C. Dimian, 2008), se decidió trabajar con un artículo en el que se alcanza una conversión del 81% como máximo. Pues éste es la única bibliografía encontrada que presenta las cinéticas que permiten hacer la modelización del reactor. A continuación se presenta el esquema de reacciones y sus ecuaciones cinéticas (J. R. Hopper, et al.,1993).

La reacción química de la amonioxidación es



Combinada con cinco posibles reacciones secundarias:



Las constantes cinéticas se pueden determinar con la ecuación de Arrhenius:

$$k_{i,T} = k_{i,T_1} \cdot e^{-\left(\frac{E_i}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (\text{Ec. 11.5.1})$$

$k_{i,T}$, Constante cinética a la temperatura deseada (s^{-1}).

k_{i,T_1} , Constante cinética a la temperatura de referencia (s^{-1}).

E_i , Energía de activación (cal/mol).

T_1 , Temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$).

En la siguiente tabla se presenta la energía de activación y la constante cinética a una temperatura de referencia para poder aplicar la ecuación de Arrhenius.

Tabla 11.5.1.- Parámetros para la ecuación de Arrhenius

Reacción	E_i [cal/mol]	k_{i,T_1} [s-1]	T_1 [$^{\circ}\text{C}$]
1	19000	0,40556	470
2	19000	0,00973	470
3	7000	0,01744	470
4	19800	6,81341	470
5	7000	0,16222	470
6	7000	0,07300	470

Se trata de un sistema de reacciones muy exotérmicas, de modo que el reactor va a necesitar un sistema de intercambio de calor para mantener la operación de forma isoterma. Las entalpías a cualquier temperatura se pueden encontrar con la siguiente expresión:

$$\Delta H_{ri}(T) = \Delta H_{ri}(298\text{ K}) + \int_{298\text{ K}}^T (\Delta C_p)_i \cdot dT \quad (\text{Ec. 11.5.2})$$

$\Delta H_{ri}(T)$, Incremento de entalpías para la temperatura deseada (J/mol).

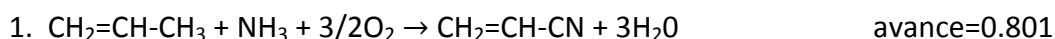
$\Delta H_{ri}(298\text{ K})$, Incremento de entalpías para 25 $^{\circ}\text{C}$ (J/mol).

Debido a que no se conoce el grado de avance de cada reacción del sistema de reacciones utilizado en el estudio cinético, se estimó la entalpía global de reacción

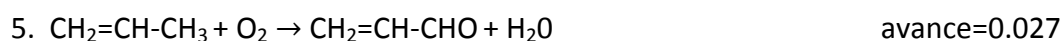
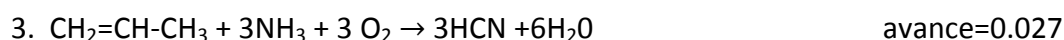
11. Manual de cálculo

mediante otro sistema de reacciones similar, que aparece en la enciclopedia Chemical Process Design: Computer-Aided Case Studies que sí ofrece los grados de avance individuales para cada reacción:

La reacción química de la amonoxidación es



Combinada con cuatro posibles reacciones secundarias:



A continuación se presentan las entalpías de reacción a 298.15 K obtenidas a partir de las entalpías de formación de cada elemento y el balance entre productos y reactivos.

Tabla 11.5.2.- Entalpías de reacción

Compuesto	Entalpía de formación ideal del gas (J/kmol*10-7) 298.15K	Coef. Esteq. /Reacción					Entalpía de reacción a 298.15K (J/mol)				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Propeno	2.02	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.02	4.05	2.02	2.02	2.02
Amoníaco	-4.59	1.0	3.0	3.0			-4.59	-13.77	-13.77		
Oxígeno	0.00	1.5	1.5	3.0	2.3	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acrilonitrilo	18.37	1.0					18.37				
Agua	-24.18	3.0	3.0	6.0	3.0	1.0	-72.54	-72.54	-145.09	-72.54	-24.18
Acroleína	-8.18					1.0					-8.18
Acetonitrilo	7.40		3.0					22.21			
Dióxido de carbono	-39.35				3.0						-118.05
Monóxido de carbono	-11.05										
Ácido cianhídrico	13.51			3.0					40.54		
							-51.61	-40.61	-92.80	-192.62	-34.38
							-516074	-406088	-927991	-1926202	-343844

Los calores específicos se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$Cp_i = \alpha_i + \beta_i \cdot T + \gamma_i \cdot T^2 + z_i \cdot T^3 \text{ (Ec. 11.5.3)}$$

Las constantes para el cálculo del calor específico se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 11.5.3.- Constantes para el cálculo de Cp

Componente	α	β	γ	z
Nitrógeno	30,78	-1,178E-02	2,390E-05	-1,000E-08
Dióxido de carbono	19,80	7,344E-02	-5,602E-05	1,715E-08
Oxígeno	28,11	-3,680E-06	1,746E-05	-1,065E-08
Propileno	3,710	2,345 E-01	1,160E-04	2,205 E-08
Amoniaco	27,31	2,383E-02	1,707E-05	-1,185E-08
Ácido cianhídrico	21,86	6,062E-02	-4,961E-05	1,815E-08
Acroleína	11,97	2,106E-01	1,071E-04	1,906E-08
Acrilonitrilo	10,69	2,208E-01	-1,565E-04	4,601E-08
Acetonitrilo	20,48	1,196E-01	-4,492E-05	3,203E-09
Agua	32,24	1,924E-03	1,055E-05	-3,596E-09

Tras los cálculos de Cp y entalpías individuales de cada reacción se obtiene la entalpía global teniendo en cuenta los grados de avance de cada una de ellas. El resultado obtenido es de,

$$\Delta H = -665112 \frac{J}{mol} = -159.118 \frac{kcal}{mol}$$

Este resultado es muy similar al de la bibliografía de -160kcal/mol.

11.5.2.- Catalizador

La cantidad de catalizador necesario para la producción del acrilonitrilo se obtiene de los datos físicos del catalizador sacados de China Petrochemical Corporation (Sinopec Group).

Size distribution, wt%:	
Passing 20 mesh	100
>90 micron	0~30
<45 micron	30~50
Bulk density, g/ml	0.88~1.12
Compact density, g/ml	1.04~1.28
Pore volume, ml/g	0.20~0.30
Attrition loss, wt%	<4
Agglomeration	no

Figura 11.5.1.- Propiedades físicas del catalizador

	MB-98™
Temperature, °C	440~450
Pressure, MPa	0.04~0.085
C ₃ H ₆ :NH ₃ :Air, mol	1:1.12~1.20:9.5
Linear velocity, m/s	0.5~0.80
WWH, hr ⁻¹	0.06~0.085

Figura 11.5.2.- Condiciones de proceso del catalizador

Con el valor de WWH, que es el peso de propileno de alimentación por unidad de peso de catalizador por hora, y la cantidad de propileno se obtiene el catalizador necesario en el reactor.

$$\frac{\text{Peso}_{\text{propileno}}/h}{\text{Peso}_{\text{catalizador}}} = 0,0725 \text{ h}^{-1} \quad (\text{Ec. 11.5.4})$$

$$m_{\text{catalizador}} = 87103,448 \text{ kg}$$

Hay que tener en cuenta que hay unas pérdidas de catalizador, ya que el conjunto de ciclones no tienen un rendimiento del 100%, por lo que quedará catalizador en los filtros.

Del artículo Jonh McCallion 1996 se obtiene que hay una pérdida de catalizador de 100 lb/d, teniendo en cuenta que el catalizador se cambia cada 5 años, se calcula la pérdida total en este periodo.

$$\text{Pérdida de catalizador en 5 años} = 68,034 \text{ ton}$$

Entonces la masa total de catalizador:

$$m_{\text{catalizador, total}} = 87,103 + 68,034 = 155,137 \text{ ton}$$

11.5.3.- Modelización del reactor

No se han observado grandes diferencias entre simular el reactor como un reactor de lecho fluidizado o como un reactor de flujo en pistón (J. R. Hopper, et al.,1993). De modo que para simplificar el sistema, el diseño se ha hecho considerando un reactor de flujo en pistón.

En un flujo pistón la variación de los caudales molares en el tiempo, considerando estado estacionario y difusión menospreciable, se expresa como:

$$\frac{dN_i}{dz} = -A \cdot r_i \quad (\text{Ec. 11.5.5})$$

Script de Matlab usado para la modelización del reactor:

```
function ModelReactor
clc, close all

% CABALS MOLARS INICIALS
NPR0=238;           %kmol/h
NNH30=NPR0*1.2;    %kmol/h
NA0=NPR0*9.5;      %kmol/h
NN20=0.79*NA0;     %kmol/h
NO20=0.21*NA0;     %kmol/h
NT0=NA0+NPR0+NNH30; %kmol/h

% REACTOR
T=420+273.15; %K
P=2; %atm
R=0.082; %atm L/mol K
u=0.5*3600; %m/h
QT0=NT0*R*T/P; %m3/h
D=sqrt(QT0/(pi/4*u)); %diametre reactor [m]
Diametre=D
A=pi/4*D^2 %m2
```


11. Manual de cálculo

```
H=5; %m
V=A*H
TRH=V/QT0*3600 %s

%PES MOLECULAR kg/kmol
PMPR=42; PMNH3=17; PMO2=32; PMAN=53; PMW=18; PMACN=41; PMACR=56; PMCO2=44;
PMCO=28; PMHCN=27; PMN2=28;

%CABALS MÀSSICS ENTRADA REACTOR
MPRO=NPRO*PMPR; MNH30=NNH30*PMNH3; MO20=NO20*PMO2; MN20=NN20*PMN2;
MA0=MN20+MO20; MT0=MPRO+MNH30+MA0;
```

Se eliminan todas las variables y se cierran las ventanas. Se definen las corrientes molares de entrada. El alimento del reactor se hace en una proporción propileno/amoníaco/aire de 1/1,2/9,5. Se considera una composición del aire del 79% de nitrógeno y del 21% de oxígeno. El reactor trabaja a una temperatura de entre 300 y 500°C, una presión de 0,5 a 2 atm, tiempos de residencia de entre 2 y 20 segundos, y una velocidad del gas de 0,4 a 0,5 m/s. (A. C. Dimian, 2008)

La operación del reactor se ha fijado 2 atm de presión (P) y la velocidad superficial (u) a 0,5 m/s. Se hicieron pruebas con distintas temperaturas, escogiendo 420°C porque se obtenía una buena conversión de propileno minimizando la aparición de subproductos. Con estos datos fijados se calcula el caudal volumétrico (Q_{TO}). Con Q_{TO} y u se puede calcular el área y el diámetro del reactor. Fijando una altura de lecho (H) de 5 m, se determina el volumen (V) necesario para la reacción. Con V y u, se calcula el tiempo de residencia hidráulico. También se calculan los caudales mássicos a partir de los pesos moleculares.

```
%Energia activació cal/mol
E1=19000; E2=19000; E3=7000; E4=7000; E5=19800; E6=7000;

%Cte. Cinètica a temperatura de referencia 1/s
k1T1=0.40556; k2T1=0.00973; k3T1=0.01744; k4T1=6.81341; k5T1=0.16222;
k6T1=0.073;

T1=470+273; %temperatura de referencia

R=1.987;

%Cte. Cinètica a temperatura de reacció 1/h
k1=k1T1*exp(-E1/R*(1/T-1/T1))*3600;
k2=k2T1*exp(-E2/R*(1/T-1/T1))*3600;
k3=k3T1*exp(-E3/R*(1/T-1/T1))*3600;
```

11. Manual de cálculo

```
k4=k4T1*exp(-E4/R*(1/T-1/T1))*3600;
k5=k5T1*exp(-E5/R*(1/T-1/T1))*3600;
k6=k6T1*exp(-E6/R*(1/T-1/T1))*3600;
```

Seguidamente se presentan las constantes cinéticas para cada una de las seis reacciones en la forma de Arrhenius, en función de una constante a temperatura de referencia, de las energías de activación y de la R.

```
%CALCUL ODE
opcions=odeset('AbsTol','1e-15','RelTol','1e-15');
[z N]=ode45(@edo,[0 H],[NPR0 NNH30 NO20 0 0 0 0 0 0 0]);
```

Se fija la tolerancia del método y se llama a la ode 45 para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de un reactor flujo pistón.

```
R=0.082;

%Cabals molars (kmol/h)
NPR=N(:,1); NNH3=N(:,2); NO2=N(:,3); NAN=N(:,4); NW=N(:,5);
NACN=N(:,6); NACR=N(:,7); NCO2=N(:,8); NCO=N(:,9); NHCN=N(:,10);

%Cabals màssics (kg/h)
MPR=NPR*PMPR; MNH3=NNH3*PMNH3; MO2=NO2*PMO2; MAN=NAN*PMAN;
MW=NW*PMW; MACN=NACN*PMACN; MACR=NACR*PMACR; MCO2=NCO2*PMCO2;
MCO=NCO*PMCO; MHCN=NHCN*PMHCN; MN2=NN20*PMN2;

%Fracció màssica
MT=MPR+MNH3+MAN+MO2+MW+MACN+MACR+MCO2+MCO+MHCN+MN2;
mPR=MPR./MT; mNH3=MNH3./MT; mO2=MO2./MT; mAN=MAN./MT;
mW=MW./MT; mACN=MACN./MT; mACR=MACR./MT; mCO2=MCO2./MT;
mCO=MCO./MT; mHCN=MHCN./MT; mN2=MN2./MT;
MMM=mPR+mNH3+mO2+mAN+mW+mACN+mACR+mCO2+mCO+mHCN+mN2;

%Fracció molar
NT=NPR+NNH3+NAN+NO2+NW+NACN+NACR+NCO2+NCO+NHCN+NN20;
nPR=NPR./NT; nNH3=NNH3./NT; nO2=NO2./NT; nAN=NAN./NT;
nW=NW./NT; nACN=NACN./NT; nACR=NACR./NT; nCO2=NCO2./NT;
nCO=NCO./NT; nHCN=NHCN./NT; nN2=NN20./NT;
```

Se redefine R para cuadrar las unidades, se definen los caudales molares y másicos, y finalmente las fracciones molares y másicas.

```
%Càlculs
conversioAN=NAN(end)/NPR0
ConversioPropile=(1-NPR(end)/NPR0)
produccio=MAN(end)/1e3*24*300 %Tn/any
```

```

figure(1)
plot(z,nPR,z,nAN,z,nACN,z,nHCN,z,nO2,z,nNH3,z,nW,z,nCO,z,nCO2)
legend('PR','AN','ACN','HCN','O2','NH3','W','CO','CO2')
title('fracció molar')
xlabel('longitud m')
ylabel('fracció molar')

%CABALS MOLARS SORTIDA (kmol/h)
NPRS=NPR(end)
NNH3S=NNH3(end)
NO2S=NO2(end)
NANS=NAN(end)
NWS=NW(end)
NACNS=NACN(end)
NACRS=NACR(end)
NCO2S=NCO2(end)
NCOS=NCO(end)
NHCNS=NHCN(end)
NN2S=NN2O
NTOTAL=NT(end)

```

Presentación de los resultados obtenidos mediante el cálculo. Se presenta la conversión referida a propileno, la conversión y producción de acrilonitrilo, un gráfico que presenta la evolución en el reactor en fracciones molares y finalmente los caudales de salida del reactor.

```

function edo=edo(z,con)
    NPR=con(1);NNH3=con(2);NO2=con(3);NAN=con(4);NW=con(5);
    NACN=con(6);NACR=con(7);NCO2=con(8);NCO=con(9);NHCN=con(10);

    NT=NPR+NNH3+NO2+NAN+NW+NACN+NACR+NCO2+NCO+NHCN+NN2O;
    QT=NT*R*T/P;

    %Càlcul concentració kmol/m3
    CPR=NPR/QT; CNH3=NNH3/QT; CO2=NO2/QT; CAN=NAN/QT; CW=NW/QT;
    CACN=NACN/QT; CACR=NACR/QT; CCO2=NCO2/QT; CCO=NCO/QT;
    CHCN=NHCN/QT;

    %velocitats de reacció kmol/m3·h
    r1=k1*CPR;
    r2=k2*CPR;
    r3=k3*CPR;
    r4=k4*CACR;
    r5=k5*CAN;
    r6=k6*CACN;

    %odes
    edo=zeros(10,1);
    edo(1)=A*(-r1-r2-r3);
    edo(2)=A*(-r1-r3-r4);
    edo(3)=A*(-3/2*r1-r2-9/4*r3-1/2*r4-2*r5-3/2*r6);

```

11. Manual de cálculo

```
edo (4) =A* (r1+r4-r5) ;
edo (5) =A* (3*r1+r2+3*r3+2*r4+r5+r6) ;
edo (6) =A* (r3-r6) ;
edo (7) =A* (r2-r4) ;
edo (8) =A* (1/2*r3+r5+r6) ;
edo (9) =A* (1/2*r3+r5) ;
edo (10) =A* (r5+r6) ;

end

end
```

Se nombra el resultado de cada una de las diferenciales como N_i . Se calcula la concentración de los compuestos (C_i) y las velocidades de reacción. Finalmente se presenta el sistema de ecuaciones diferenciales, que expresan la variación de caudales molares a lo largo del reactor.

Con esta simulación se consigue una conversión de propileno del 82,02%. La conversión a acrilonitrilo es del 52,78% con una producción de 47.938 t/año. Se requiere un volumen de reacción de 219,822 m³, que para una altura de 5 m tendría un diámetro de 7,482 m. Se decide usar dos reactores iguales debido al gran tamaño. En la tabla siguiente se resumen las condiciones de operación y las dimensiones de los reactores.

Tabla 11.5.4.- Dimensiones y datos de operación R-201 y R-202

Volumen [m3]	109,911
Altura [m]	5
Diámetro [m3]	3,741
u [s]	0,5
TRH	10
T [°C]	420
P [atm]	2

Los resultados de la simulación se presentan a continuación. En las figura 11.5.3, se puede observar la evolución de los componentes a lo largo de un reactor.

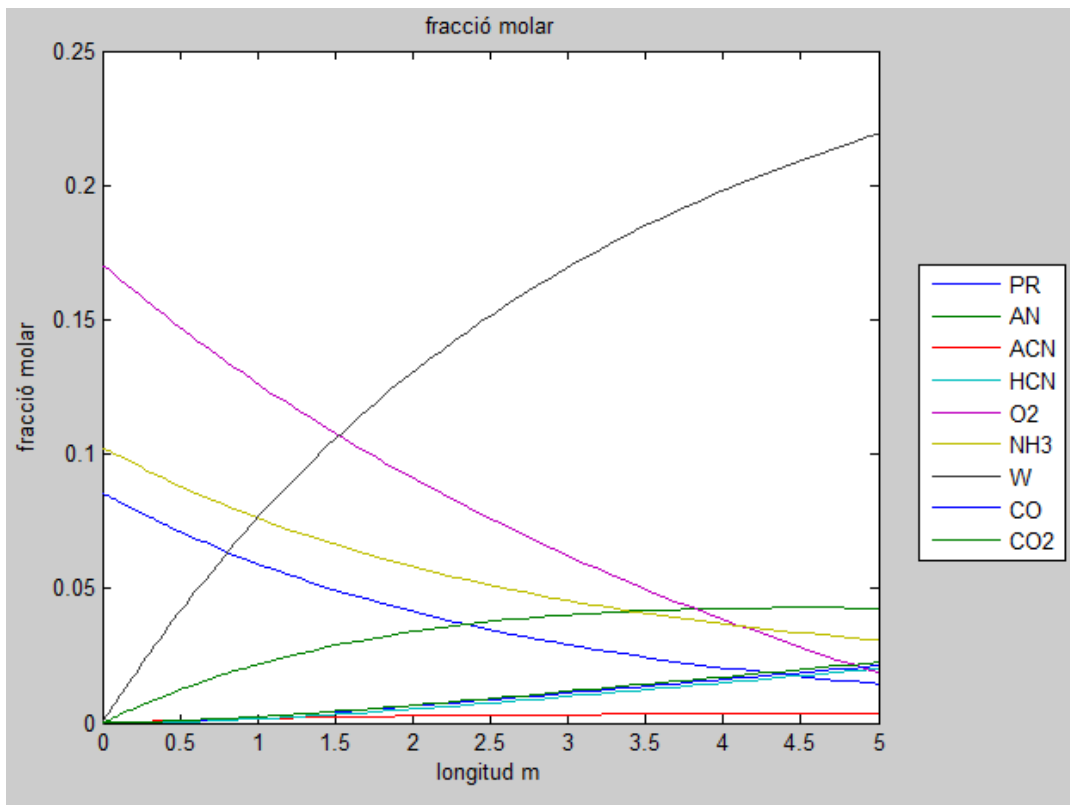


Figura 11.5.3.- Evolución de las fracciones molares a lo largo del reactor.

En la siguiente tabla se presenta el balance de materia en los dos reactores, en caudales molares.

Tabla 11.5.5.- Caudales molares entrada y salida del reactor

Componente	N _i entrada reactor [kmol/h]	N _i salida reactor [kmol/h]
Nitrógeno	1786,2	1786,2
Monóxido de carbono	0	62,717
Dióxido de carbono	0	66,372
Oxígeno	474,810	54,508
Propileno	238	42,785
Amoniaco	285,600	90,420
Ácido cianhídrico	0	59,533
Acroleína	0	0,035
Acrilonitrilo	0	125,624
Acetonitrilo	0	10,023
Agua	0	645,108
TOTAL	2784,6	2943,3

11.5.4.- Ciclones para la recuperación del catalizador

La corriente gaseosa de salida de la zona de reacción en el reactor se hace pasar por unos ciclones múltiples para recuperar el catalizador. Los ciclones son dispositivos diseñados para separar partículas de diámetro superior a 5 μm . El principio de funcionamiento se basa en la separación de las partículas mediante la fuerza centrífuga.

Si se montara un único ciclón tendría unas dimensiones muy grandes y su manejo se complicaría. Por este motivo, se ha previsto una serie de ciclones de menores dimensiones. Por la consulta de varias patentes, se ha llegado a la conclusión de que la colocación de los ciclones más eficiente, es poner primero un ciclón y en serie con éste dos en paralelo del mismo tamaño. (John McCallion,1996).

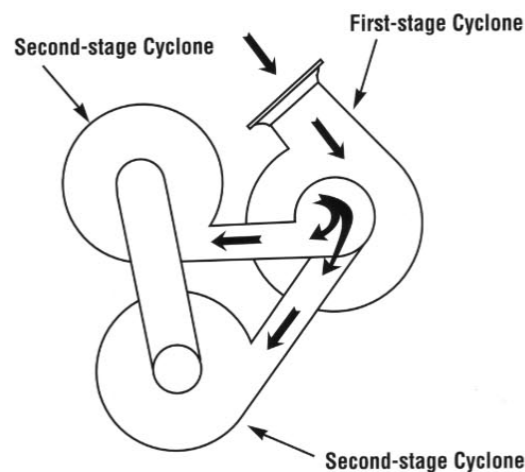


Figura 11.5.4.- Esquema de los ciclones utilizados en el reactor.

Los ciclones utilizados son de entrada de gas tangencial y descarga de los sólidos axial; y por el tamaño de partícula y la capacidad se escogió los ciclones convencionales.

Dentro de esta familia, se calculó la eficiencia para cada tipo de ciclón, dando la mayor para los ciclones Zenz.

Las dimensiones de un ciclón se pueden observar en la siguiente tabla.

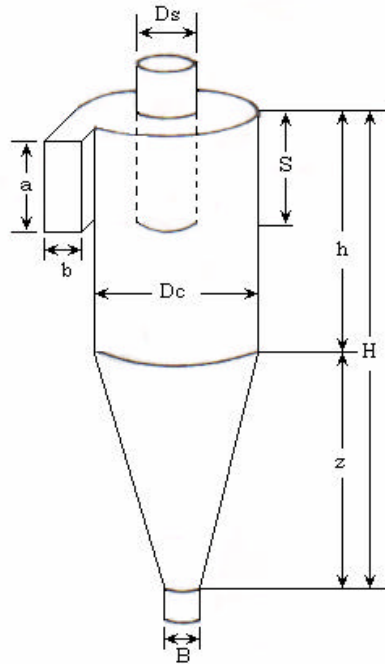


Figura 11.5.5.- Dimensiones de un ciclón.

Se selecciona una velocidad de entrada al ciclón de 22 m/s. Con este valor se puede determinar el diámetro del ciclón y las otras dimensiones con base en las relaciones establecidas para las familias de ciclones.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	b/D_c	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	S/D_c	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	h/D_c	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	z/D_c	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida partículas	B/D_c	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	6.0	5.5	3.9	6.0

Figura 11.5.6.- Características de los ciclones convencionales

Para calcular la eficiencia del ciclón se requiere calcular primero si hay o no re suspensión, que las partículas ya separadas vuelvan a ponerse en suspensión; ya que

de presentarse en el ciclón, la ecuación de Leith y Licht estaría sobrestimando la eficiencia del ciclón.

Si la relación de velocidades es menor que 1,35 no hay re suspensión de las partículas, y se puede proceder a calcular la eficiencia.

Para hallar la relación de velocidades se requiere primero estimar la velocidad equivalente y luego la velocidad de saltación.

$$w = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho)}{3 \times \rho^2}} \quad (\text{Ec. 11.5.6})$$

w : Velocidad equivalente $\left(\frac{m}{s}\right)$.

g : Aceleración de la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$.

μ : Viscosidad del gas a la entrada $\left(\frac{kg}{m \times s}\right)$.

ρ_p : Densidad del catalizador $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

ρ : Densidad del gas a la entrada $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

$$V_s = \frac{4,913 \times W \times k_b^{0,4} \times D_c^{0,067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - k_b}} \quad (\text{Ec. 11.5.7})$$

V_s : Velocidad de saltación $\left(\frac{m}{s}\right)$.

k_b : Relación entre al ancho de la entrada y el diámetro del ciclón $\left(\frac{b}{D_c}\right)$.

D_c : Diámetro del ciclón (m).

V_i : Velocidad de entrada del gas en el ciclón $\left(\frac{m}{s}\right)$.

$$\frac{V_i}{V_s} = \frac{22}{18,42} = 1,19 \quad (\text{Ec. 11.5.8})$$

Como se puede comprobar no hay re suspensión, por lo que se calcula la eficiencia.

La teoría de Leith y Licht es la que mejor se adapta al comportamiento experimental. Esta teoría predice las eficiencias de colección de las partículas, basándose en las propiedades físicas del material y el gas de arrastre, y en las relaciones entre proporciones del ciclón.

$$\eta_i = 1 - e \left[-2 \times \left(\frac{G \times T_i \times Q \times (n + 1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right] \quad (\text{Ec. 11.5.9})$$

η_i : Eficiencia fraccional para intervalos de tamaño.

G : Factor de configuración del ciclón.

T_i : Tiempo de relajación para cada partícula (s).

Q : Caudal de gas $\left(\frac{m^3}{s}\right)$.

n : Exponente del vórtice del ciclón.

El factor de configuración del ciclón se obtiene de la tabla de características de los ciclones convencionales y el tiempo de relajación y el exponente del vórtice mediante las siguientes ecuaciones.

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18 \times \mu} \quad (\text{Ec. 11.5.10})$$

D_{pi} : Diámetro de la partícula (m).

$$n = 1 - (1 - 0,67 \times D_c^{0,14}) \times \left(\frac{T}{283} \right)^{0,3} \quad (\text{Ec. 11.5.11})$$

T : Temperatura del gas (k).

Como la concentración de partículas es superior a 2 g/m^3 hay que corregir la ecuación de la eficiencia fraccional.

$$\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{0,182} \quad (\text{Ec. 11.5.12})$$

C_1 : Concentración de las partículas $2 \frac{g}{m^3}$.

η_1 : Eficiencia fraccional para la concentración de $2 \frac{g}{m^3}$.

C_2 : Concentración real del catalizador $\frac{g}{m^3}$.

η_2 : Eficiencia fraccional corregida para el valor de la concentración real.

Por ultimo ya se puede calcular la eficiencia global.

$$\eta_T = \sum \eta_i \times m_i \quad (\text{Ec. 11. 5. 13})$$

m_i : Porcentaje másico (%).

η_T : Porcentaje global (%).

A continuación se calcula la caída de presión en el ciclón, si ésta es menor que 2488,16 Pa es aceptable.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times V_i^2 \times N_H \quad (\text{Ec. 11. 5. 14})$$

ΔP : Caída de presión en el ciclón (Pa).

N_H : Número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón.

$$N_H = K \times \frac{a \times b}{D_s^2} \quad (\text{Ec. 11. 5. 15})$$

K : Constante, toma el valor de 16 para entrada tangencial.

a : Altura de entrada al ciclón (m).

b : Ancho de entrada al ciclón (m).

D_s : Diámetro de salida (m).

Se hacen los cálculos para el primer ciclón y con la salida de este, se calculan los otros dos ciclones en paralelo.

Como hay dos reactores se ponen los ciclones múltiples para cada uno de ellos. Por lo que para el reactor R-201 se colocan los ciclones CI-201, CI-202 y CI-203 y para el reactor R-202, los ciclones CI-204, CI-205 y CI-206.

Tabla 11.5.6.- Dimensiones del primer ciclón.(CI-201 y CI-204)

Dc (Diámetro del ciclón)	2,056
Altura total del ciclón (H)	8,224
η global	99,279
Δp (Pa)	1853,139

Tabla 11.5.7.- Dimensiones de los ciclones paralelos. (CI-202, CI-203, CI-205 y CI-206).

Dc (Diámetro del ciclón)	1,454
Altura total del ciclón (H)	5,815
η global	98,608
Δp (Pa)	1853,139

11.5.5.- Sistema de intercambio de calor

Debido a que la reacción dentro del reactor es exotérmica, se va aprovechar ese calor para formar vapor a media presión. Para ello se necesitan unos tubos que generen ese vapor.

Como ya se dijo anteriormente, se ponen dos reactores por lo que se va a calcular el diseño de los tubos para uno de ellos y el otro es idéntico.

Los reactivos entran a 250°C y para alcanzar la Temperatura de reacción (420°C) gastan parte del calor generado. Por lo que, lo primero es calcular ese calor.

$$q = \frac{m}{3600} \times C_p \times \Delta T \quad (\text{Ec. 11.5.16})$$

Tabla 11.5.7.-Calores de los reactivos para alcanzar la Temperatura de reacción.

Q propileno (kW)	549,547
Q amoniaco (kW)	284,455
Q aire (kW)	1578,012

Al calor de reacción de un reactor hay que restarle estos calores de los reactivos y con el resultado calcular los tubos.

$$q = 13439,414 \text{ kW}$$

Se calcula la cantidad de agua necesaria, con el vapor que se quiere conseguir que es de 40 bar y 260 °C y la temperatura del agua de entrada que es 150 °C.

$$q = m_{tubos} \times \left(C_{p \text{ liq}} \times (T_{eb} - t_1) + \lambda + C_{p \text{ vap}} \times (t_2 - T_{eb}) \right) \quad (\text{Ec. 11.5.17})$$

q : Calor de reacción (W).

m_{tubos} : Cantidad de agua necesaria $\left(\frac{kg}{s}\right)$.

T_{eb} : Temperatura de ebullición (°C).

$t_1 t_2$: Temperatura de entrada y salida del agua, 150 °C y 260°C.

λ : Calor latente de vaporización $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

Lo que se quiere calcular es el número de tubos necesarios para generar el vapor con el calor de la reacción. Para ello se requiere hacer una iteración.

Se calcula el coeficiente individual de transmisión de calor del lado de los tubos.

Suponiendo un número de tubos y calculando el área de paso de cada tubo.

$$G = \frac{m_{tubos}}{A_{paso} \times N_{tubos}} \quad (\text{Ec. 11.5.18})$$

G , Caudal del agua por área (kg/(m²s)).

N_{tubos} , número de tubos supuesto.

Se utiliza la correlación de Nusselt para obtener el coeficiente.

$$Nu = 0,01 \times R_e^{\frac{2}{3}} \times P_{r,liq}^{-0,7} \quad (\text{Ec. 11. 5. 19})$$

Nu : Número adimensional nusselt.

R_e : Número adimensional reynolds.

$P_{r,liq}$: Número adimensional prandtl .

$$h_{int} = \frac{Nu \times k}{\frac{D_i}{100}} \quad (\text{Ec. 11. 5. 20})$$

k : Coeficiente de conductividad térmica $\left(\frac{kcal}{m \cdot k \cdot h}\right)$.

A continuación se calcula el coeficiente individual de transmisión de calor del lado de la carcasa, mediante el número de Arquímedes.

$$Nu = 0,75 \times Arq^{0,22} \times \left(1 - \frac{D_e}{pitch}\right)^{0,14} \quad (\text{Ec. 11. 5. 21})$$

$pitch$: Distancia entre los tubos (cm).

Arq : Número de Arquímedes.

$$Arq = \frac{9,81 \times D_p^3 \times \rho_{gas}}{\mu_{gas}^2 \times \left(\frac{\rho_p - \rho_{gas}}{\rho_{gas}}\right)} \quad (\text{Ec. 11. 5. 22})$$

D_p : Diámetro de las partículas (m).

ρ_{gas} : Densidad del gas $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

ρ_p : Densidad de las partículas $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

μ_{gas} : Viscosidad del gas $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$.

$$h_{ext} = \frac{Nu \times k_{gas}}{D_p} \quad (\text{Ec. 11. 5. 23})$$

Teniendo los coeficientes individuales de transmisión de calor, tanto de los tubos como de la carcasa, ya se puede calcular el coeficiente global de transmisión de calor.

$$U_{ext} = \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_i}\right) \times \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{Ec. 11. 5. 24})$$

U_{ext} : Coeficiente global de transmisión de calor $\left(\frac{kcal}{m^2 * k * h}\right)$.

D_e, D_i : Diámetro exterior e interior del tubo (cm).

h_i, h_e : Coeficiente individual de transmisión de calor interno y externo $\left(\frac{kcal}{m^2 * k * h}\right)$.

Ahora, hay que comprobar que el número de tubos supuesto es el correcto, partiendo de la ecuación de transmisión de calor se calcula el área de intercambio. Ya se conoce que la temperatura de entrada y salida del agua es 150 y 260 °C y que la temperatura del reactor es 420 °C, con esto ya se puede calcular la media logarítmica.

$$q = A \times U_{ext} \times \Delta T_{ml} \quad (\text{Ec. 11. 5. 25})$$

ΔT_{ml} : Incremento de temperatura media logarítmica.

Para saber el área del tubo hay que conocer sus dimensiones y el tipo de material.

$$A_{tubo} = \pi \times D_e \times L \quad (\text{Ec. 11. 5. 26})$$

Se escoge el diámetro exterior del tubo y el material de acero inoxidable TP 316, y se calcula el espesor por las normas americanas ANSI. (J.Baquero, 1985)

$$t = \left(\frac{P \times D_e}{2 \times SE} + C\right) \times M \quad (\text{Ec. 11. 5. 27})$$

t : Espesor mínimo tubo (in).

P : Presión del tubo (psi).

SE: Tensión máxima admitida por el material (psi).

M: Tolerancia de fabricación.

C: Sobre espesor de corrosión (in).

Se calcula el espesor mínimo y después se busca el espesor comercial más próximo para ese diámetro externo.

Tabla 11.5.8.- Datos de los tubos

D nominal (in)	3
d ext tubo (mm)	88,9
espesor comercial(mm)	2,11
d int tubo (m)	0,087
L (m)	5
pitch [cm]	14

Se calcula el número de tubos y se itera hasta que este número de tubos sea igual al supuesto.

$$N_{tubos} = \frac{A}{A_{tubos}} \quad (\text{Ec. 11.5.28})$$

Una vez calculado se redondea y ya se tiene el número de tubos final.

Tabla 11.5.9.- Datos finales del intercambio de calor

mt (kg/s)	5,957
Ntubos escogido	82,000
h tubos (kcal/(hm²·°C))	5139,490
hext (kcal/(m²·h·°C))	635,281
U ext (kcal/(hm²·°C))	563,886
A (m²)	113,372

11.5.6.- Diseño mecánico del reactor**11.5.6.1- Cálculo del espesor de la pared cilíndrica**

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S). (J. Baquero, 1985)

$$P_p = P_{operación} \times 1,1 \text{ (Ec. 11.2.5)}$$

$$T_p = T_{operación} + 20^\circ C \text{ (Ec. 11.2.6)}$$

El material elegido para la carcasa del reactor es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (—X—ray spot[®]).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \text{ (Ec. 11.2.7)}$$

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.5.10.- Datos para el cálculo del espesor

P proyecto (atm)	2,20
D_{int} (mm)	3827,571
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (atm)	833,97
t (mm)	5,951

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11.2.8)}$$

$$\text{espesor de la pared cilíndrica} = 9mm$$

11.5.6.2- Cálculo del espesor del cabezal

El cabezal elegido es el toriesférico o Klopper ya que la presión de proyecto es baja.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal toriesférico se emplea la siguiente fórmula sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{0,885 \times P_p \times R_i}{S \times E - 0,1 \times P_p} \quad (\text{Ec. 11.2.9})$$

Para su uso se debe cumplir $\frac{t}{R_i} > 0,002$, para el radio interno del reactor sale un espesor mínimo (t_{min}) de 3,7mm, si el espesor calculado es mayor a este valor la fórmula utilizada es la correcta.

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(5,134 + 2mm) \quad (\text{Ec. 11.2.10})$$

espesor del cabezal (t) = 8mm

Para poder calcular la altura total del reactor se necesita la altura del cabezal, para ello se utilizan las relaciones y ecuaciones que se muestran, sacadas de una empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH).

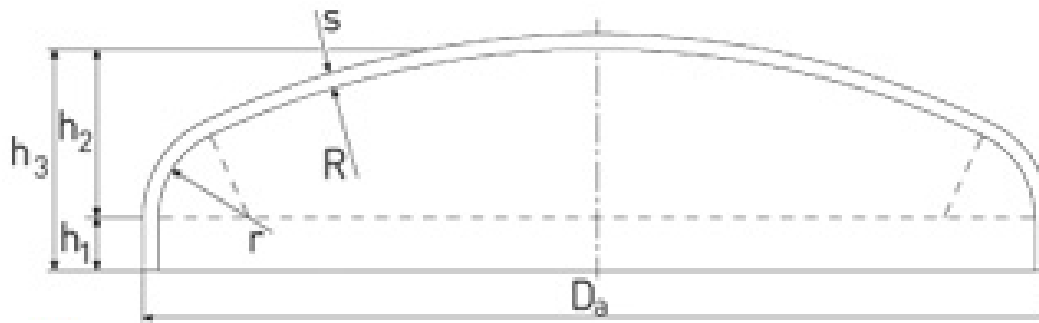


Figura 11.5.7.- Cabezal toriesférico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH

$$R = Da$$

$$r = 0,1 \times Da$$

$$h_1 \geq 3,5 \times t$$

$$h_2 = 0,1935 \times Da - 0,455 \times t$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \text{ (Ec. 11. 2. 11)}$$

Los datos obtenidos para el cabezal se muestran a continuación.

Tabla 11.5.11.- Datos obtenidos para el cabezal

R(mm)	3843,571
r(mm)	384,357
h1(mm)	28,000
h2(mm)	740,091
h3(mm)	768,091

El volumen para el cabezal toriesférico se obtiene con la siguiente fórmula (L. Brownell ,E.Young).

$$V_i = 0,084672 \times D_i^2$$

$$V_e = 0,084672 \times D_e^2$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \text{ (Ec. 11. 2. 12)}$$

$$V_i = 1,240 \text{ m}^3$$

$$V_e = 1,251 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,010 \text{ m}^3$$

11.5.6.3.- Cálculo de la altura total del reactor y superficie lateral del cuerpo cilíndrico

Altura total reactor

$$= A \text{ zona reaccion} + 2 * A \text{ cabezal} + A \text{ ciclones} + 2 \quad (\text{Ec. 11. 5. 29})$$

Se le suman 2 m para el espacio entre los equipos internos (distribuidores, entradas...)

$$Altura_{total} = 5 + 2 * 0,768 + 8,223 + 5,815 + 2$$

$$Altura_{total} = 22,575 \text{ m}$$

$$Area_{lateral} = L \times \pi \times D_e \quad (\text{Ec. 11. 2. 15})$$

$$Area_{lateral} = (5 + 8,223 + 5,815) \times \pi \times 3,757$$

$$Area_{lateral} = 254,172 \text{ m}^2$$

11.5.6.4- Cálculo del peso del reactor vacío

Para el cálculo del peso del reactor vacío hay que calcular el peso de la carcasa lateral y el peso de los cabezales. Se utiliza la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{kg}{m^3}$).

Peso reactor vacio

$$= \text{Peso de la carcasa lateral} + 2 \times \text{Peso cabezal} \quad (\text{Ec. 11. 5. 30})$$

$$Peso_{lateral} = Area_{anular} \times h \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11. 5. 31})$$

$$Area_{anular} = \frac{\pi}{4} \times (D_e^2 - D_i^2)$$

$$Peso_{lateral} = 18234,754 \text{ kg}$$

$$Peso_{cabezal} = V_{pared} \times \rho_{acero} \quad (\text{Ec. 11. 5. 32})$$

11. Manual de cálculo

$$Peso_{cabezal} = 83,036 \text{ kg}$$

$$Peso_{reactor \text{ vacio}} = 18400,826 \text{ kg}$$

11.5.6.5.- Cálculo del peso de los tubos vacíos

$$Peso_{tubos} = \frac{\pi}{4} \times (D_{e,tubos}^2 - D_{i,tubos}^2) \times L \times N_{tubos} \times \rho_{acero} \text{ (Ec. 11. 5. 33)}$$

$$Peso_{tubos} = 965,45 \text{ kg}$$

11.5.6.6- Cálculo del peso de los tubos llenos

$$V_{interno \text{ tubos}} = \frac{\pi}{4} \times D_{i,tubos}^2 \times L \times N_{tubos} \text{ (Ec. 11. 5. 34)}$$

$$Peso \text{ del agua que llena los tubos} = V_{interno \text{ tubos}} \times \rho_{agua} \text{ (Ec. 11. 5. 35)}$$

$$Peso \text{ del agua que llena los tubos} = 2265,214 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ de los tubos llenos} = peso \text{ de los tubos} + peso \text{ del agua} \text{ (Ec. 11. 5. 36)}$$

$$Peso \text{ de los tubos llenos} = 3230,625 \text{ kg}$$

11.5.6.7- Cálculo del espesor de los ciclones

Cálculo del espesor de la parte cilíndrica de los ciclones

Para el cálculo del grosor es necesario conocer previamente la presión y temperatura de proyecto (P_p y T_p), diámetro interno (D_i), factor de soldadura (E) y factor de estrés (S) (J.Baquero, 1985).

Primero, se fija la temperatura de proyecto considerando la temperatura más elevada de la columna que corresponde a 420 °C, y la presión de operación que es 2 atm.

$$P_p = P_{operación} \times 1,1 \text{ (Ec. 11.2.5)}$$

$$T_p = T_{operación} + 20^{\circ}C \text{ (Ec. 11.2.6)}$$

El material elegido para la carcasa del reactor es el acero inoxidable 316 L, ya que las sustancias del interior son corrosivas. Teniendo en cuenta esto y la temperatura de proyecto se obtiene de las tablas ASME el factor de estrés (S).

El valor del factor de soldadura es 0,85, ya que se trata de soldadura a tope con cordón preparado en X con radiografiado en los puntos de soldadura (X-ray spot).

Se calcula el espesor con la siguiente ecuación, sacada de las tablas ASME.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times S \times E - 1,2 \times P_p} \text{ (Ec. 11.2.7)}$$

Al espesor dado se le suma un valor de tolerancia a la corrosión (2mm), se sobredimensiona el total un 10% y se redondea a la alza.

$$t = 1,1(t + 2mm) \text{ (Ec. 11.2.8)}$$

Primero se realiza el cálculo para el primer ciclón y posteriormente para los ciclones paralelos.

Los datos utilizados para el cálculo y el espesor obtenido se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11.5.12.- Datos para el cálculo del espesor de la parte cilíndrica del primer ciclón.

P proyecto (atm)	2,2
Dint (mm)	2055,91
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (atm)	833,97
t (mm)	3,20

espesor de la pared cilíndrica primer cicón = 6 mm

Tabla 11.5.13.- Datos para el cálculo del espesor de la parte cilíndrica de los ciclones paralelos.

P proyecto (atm)	2,2
Dint (mm)	1453,75
Factor de soldadura (E)	0,85
Factor estrés (S) (atm)	833,97
t (mm)	2,26

espesor de la pared cilíndrica ciclones paralelos = 5 mm

Cálculo del espesor de la parte cónica

Para calcular el espesor de la parte cónica se escoge un cabezal cono de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

El material usado es también, acero inoxidable 316 L, y los datos de presión de proyecto, factor de soldadura y el factor de estrés son los mismos que para la pared cilíndrica.

Para el cálculo del espesor del cabezal se emplea la siguiente formula sacada de las tablas ASME para cabezales cónicos.

$$t = \frac{P_p \times D_i}{2 \times \cos \alpha \times (S \times E - 0,6 \times P_p)} \quad (\text{Ec. 11. 5. 37})$$

α : Mitad del ángulo del cono (grados).

Al valor obtenido del espesor se le suma un valor de tolerancia de corrosión (2mm) y se sobredimensiona un 10%.

$$t = 1,1(t + 2mm)$$

El cabezal cónico escogido es de la empresa alemana de venta de cabezales (WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH) y se muestra a continuación.

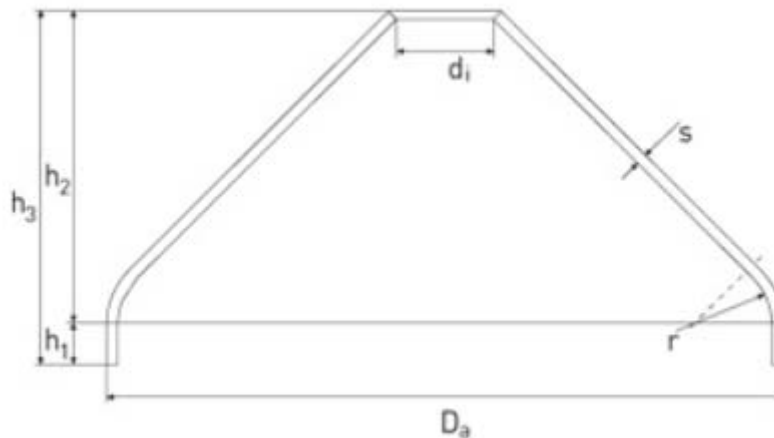


Tabla 11.5.8.- Cabezal cónico de la empresa WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH.

Se calcula el volumen interior y exterior del cono para calcular el de la pared.

$$V = \frac{\pi \times D^2 \times h}{4 \times 3} \quad (\text{Ec. 11. 5. 38})$$

$$V_{pared} = V_e - V_i \quad (\text{Ec. 11. 5. 39})$$

Se calculan los datos del cabezal cónico para el primer ciclón.

$$\text{espesor del cabezal para el primer ciclón}(t) = 6 \text{ mm}$$

$$V_i = 4,55 \text{ m}^3$$

$$V_e = 4,59 \text{ m}^3$$

$$V_{pared} = 0,04 \text{ m}^3$$

Se calculan los datos del cabezal cónico para los ciclones paralelos.

$$\text{espesor del cabezal para los ciclones paralelos}(t) = 5 \text{ mm}$$

11. Manual de cálculo

$$V_i = 1,61 \text{ m}^3$$

$$V_e = 1,63 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{pared}} = 0,02 \text{ m}^3$$

Cálculo de la superficie lateral cilíndrica de cada ciclón

$$Area_{\text{lateral}} = L \times \pi \times D_e$$

$$Area_{\text{lateral}} \text{ para primer ciclón} = 26,71 \text{ m}^2$$

$$Area_{\text{lateral}} \text{ para ciclones en paralelo} = 13,37 \text{ m}^2$$

11.5.6.8.- Cálculo del peso de los ciclones vacíos

Para el cálculo del peso de los ciclones vacíos hay que calcular el volumen que ocupa la chapa en la pared cilíndrica y en los cabezales. Para el cuerpo cilíndrico se multiplica el área superficial por el espesor y para los cabezales se calcula el volumen de la pared. Estos volúmenes se multiplican por la densidad del acero inoxidable 316 L a 20 °C ($7990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), y ya se obtiene el peso de cada parte.

$$Peso \text{ ciclón vacío} = Peso \text{ de la carcasa lateral} + Peso \text{ cabezal} \text{ (Ec. 11. 5. 40)}$$

$$Peso_{\text{lateral}} = Area_{\text{lateral}} \times \text{espesor} \times \rho_{\text{acero}}$$

$$Peso_{\text{cabezal}} = V_{\text{pared}} \times \rho_{\text{acero}}$$

$$Peso_{\text{primer ciclón vacío}} = 1599,82 \text{ kg}$$

$$Peso_{\text{ciclones paralelos vacios}} = 667,21 \text{ kg}$$

Se calcula el peso de todos los ciclones.

$$\text{Peso total ciclones} = \text{Peso primer ciclón} + 2 * \text{Peso ciclones paralelos}$$

$$\text{Peso}_{\text{total ciclones vacío}} = 2934,250 \text{ kg}$$

11.5.6.9.- Cálculo del peso de los ciclones llenos

Se calcula el peso de los ciclones llenos de agua y de fluido.

peso de fluido que llena el ciclón

$$= \left(\frac{\pi \times D_i^2}{4} \times h + V_{i\text{cabezal}} \right) \times \rho_{\text{fluido}} \text{ (Ec. 11.5.41)}$$

La densidad que se utiliza es la del gas que sale del reactor y que circula por los ciclones, que ya se utilizó para el cálculo de éstos.

$$\text{Peso columna llena} = \text{Peso de la columna vacía} + \text{Peso fluido}$$

Se calcula para el primer ciclón y para los ciclones en paralelo y después se suma, para calcular el total.

Primer ciclón

$$\text{Peso del agua} = 18183,611 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de fluido} = 6428,877 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena agua} = 19783,343 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena fluido} = 7096,09 \text{ kg}$$

Ciclón en paralelo

$$\text{Peso del agua} = 6428,877 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de fluido} = 6,159 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena agua} = 7096,092 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la columna llena fluido} = 673,374 \text{ kg}$$

Peso total de los 3 ciclones llenos de agua y fluido.

$$\text{Peso total ciclones} = \text{Peso primer ciclón} + 2 * \text{Peso ciclones paralelos}$$

$$\text{Peso total de los ciclones llenos agua} = 33975,619 \text{ kg}$$

$$\text{Peso total de los ciclones llenos fluido} = 2963,993 \text{ kg}$$

11.5.6.10.- Cálculo del reactor lleno

Se calcula el peso total del reactor lleno de agua y de fluido.

$$\text{Peso total reactor}$$

$$= P_{3 \text{ ciclones}} + P_{\text{tubos}} + P_{\text{reactor vacío}} \\ + P_{\text{fluido dentro reactor}} \text{ (Ec. 11. 5. 42)}$$

$$\text{Peso total reactor lleno agua} = 115565,579 \text{ kg}$$

$$\text{Peso total reactor lleno fluido} = 24652,888 \text{ kg}$$

11.5.6.11.- Cálculo del espesor de aislamiento

Para el aislamiento se va a utilizar lana mineral de roca y el cálculo de su espesor óptimo se realiza con el programa Insulan que lo proporciona la empresa Calorcol. El aislamiento elegido es manta aislante de 140 kg/m^3 y para la temperatura interior del reactor se coge la de proyecto.

Para la temperatura de aislamiento deseada se ponen 45°C , una temperatura ambiente de 25°C y una velocidad superficial del aire de $0,5 \text{ m/s}$. Se escoge acero inoxidable, tanto para la superficie exterior como para la superficie desnuda.

Todos estos datos se muestran en la figura 11.5.9 y los espesores recomendados por el programa se observan en la tabla 11.5.14.

Cálculo de Espesor Óptimo - Pérdida de Calor - Equipos [1]

CALORCOL
LANA MINERAL DE ROCA

Mantas Aislantes de 140 kg/m³

Datos de Entrada:

Temperatura Interior: 440 °C

Temperatura Superficie Aislamiento: 45 °C

Temperatura Ambiente: 25 °C

Velocidad del Aire: 0.5 m/s

Superficie Exterior Aislamiento: 7 Código Material: 7 Emisividad: 0.13 Consultar

Superficie Desnuda: 2 Código Material: 2 Emisividad: 0.3 Consultar

Calcular Cancelar Graficar

CALORCOL S.A Calle 46 N° 71 - 121 Copacabana (Antioquia - Colombia)
PBX: (574) 274 41 49 FAX: (574) 274 56 92 Email: info@calorcol.com Web: http://www.calorcol.com

Figura 11.5.9.- Datos para el reactor

Tabla 11.5.14.- Espesores recomendados de aislante

	Temperatura superficie aislamiento (°C)	Espesor aislamiento recomendado(mm)	Eficiencia (%)
Superficie plana horizontal Cara arriba	39,78	254	98,95
Superficie plana vertical	42,48	254	98,81
Superficie plana horizontal Cara abajo	48,51	254	98,55

11.5.6.12.- Equipos internos del reactor

➤ **Soporte del catalizador**

Se pone un soporte para mantener aquellas partículas que no estuvieran en fluidización.

El soporte elegido es APS-GS de la empresa Amistco, que retiene el catalizador pero dejando paso al flujo de aire.

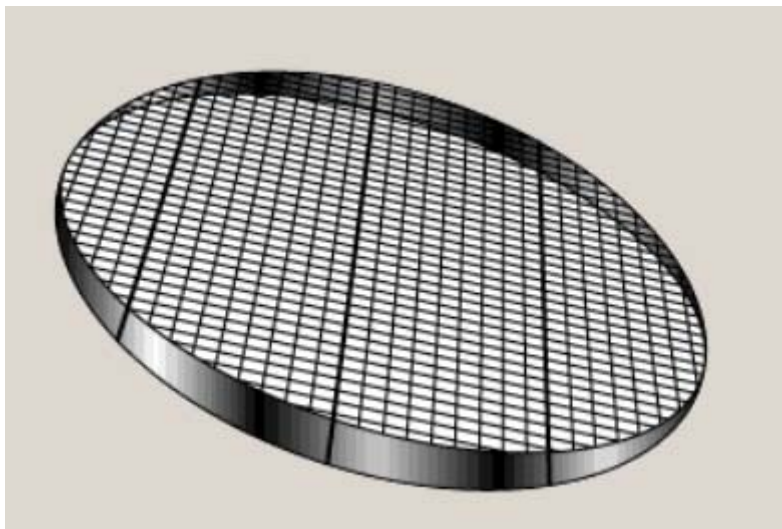


Figura 11.5.10.- Soporte tipo rejilla de la empresa Amistco.

➤ **Distribuidor de vapor**

Distribuidores de gas o vapor se utilizan para lograr un flujo de gas uniforme en todo el diámetro de la columna.

El distribuidor escogido es el modelo 768 EVENFLOW™ de la empresa Koch-Glitsch, que se utiliza para vapor y diámetros mayores que 1,8 m.

Este distribuidor se utiliza para flujos de entrada de vapor de alta energía, entrando a través de una entrada radial. Aunque el dispositivo se pudiera utilizar con mezclas, se mejora el rendimiento cuando se limita la alimentación exclusivamente a vapor.

Para obtener una buena distribución en este reactor de 3,828 m, se ponen 2 distribuidores de este tipo.

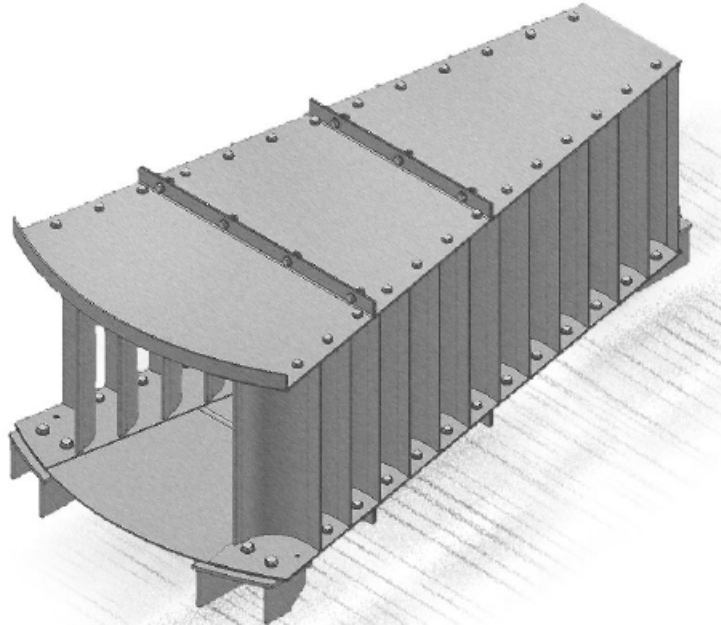


Figura 11.5.11.- Distribuidor de vapor modelo 768 EVENFLOW™ de la empresa Koch-Glitsch.

➤ Colocación del reactor

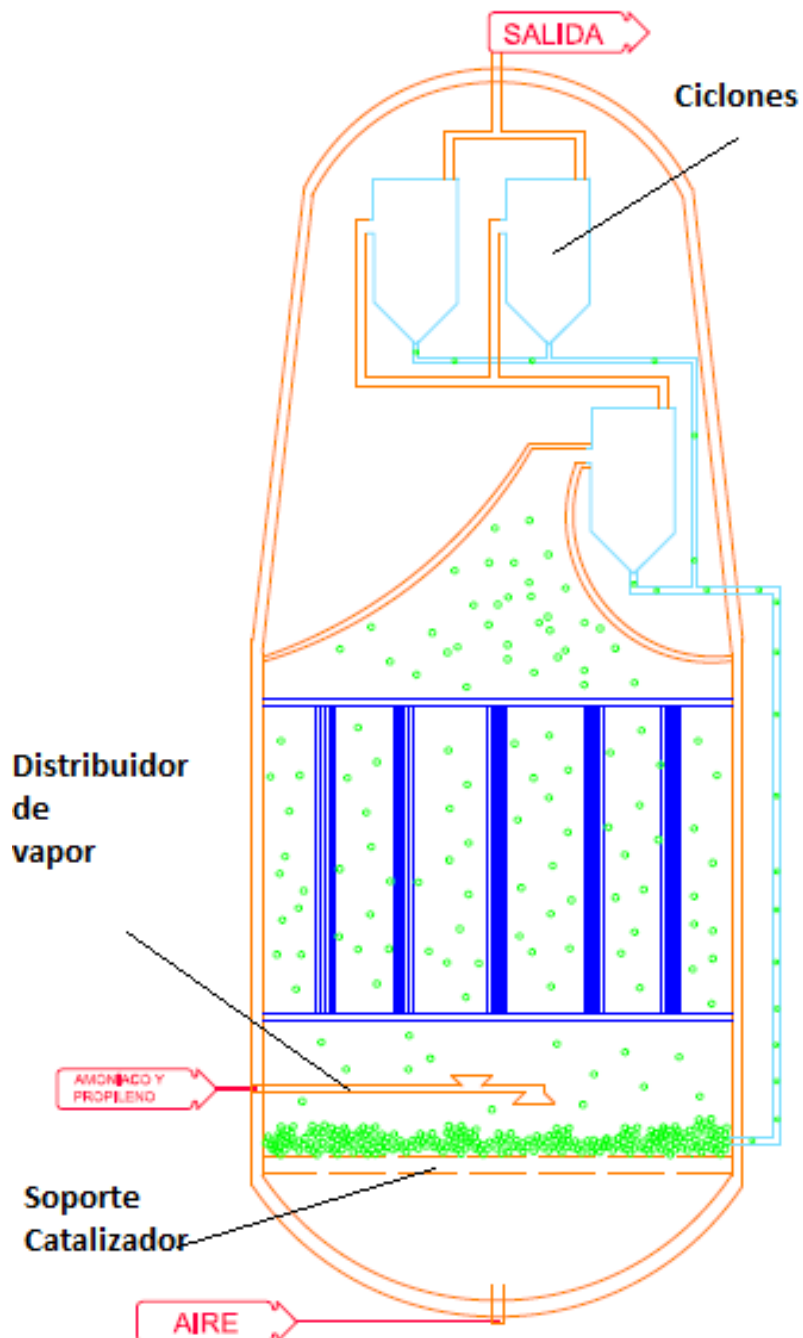


Figura 11.5.12.- Colocación del reactor.

11.6.- INTERCAMBIADORES DE CALOR

11.6.1.- Intercambiadores de carcasa y tubos

El método explicado a continuación se ha usado para diseñar intercambiadores sin cambio de fase e intercambiadores con cambio de fase. Dentro de los intercambiadores con cambio de fase hay que hacer mención especial a los condensadores de cabezas de las columnas. Los intercambiadores H202, H204, H801, H802 son sin cambio de fase. En los H201, H203, H205, H301, H302 y H502 hay cambio de fase igual que en los condensadores de cabezas de las columnas C301, C302, C501, C502, C601, C602 y C701.

Para el diseño de todos ellos se ha seguido el método de Kern, explicado paso a paso a continuación y con un ejemplo de cálculo con el condensador de cabeza C301.

1. Objetivo del intercambiador

El primer paso de diseño es caracterizar las corrientes. Hay que definir que fluido refrigerante o calefactor se va a usar, y a que temperatura va a operar. También hay que definir cuál de ellos circulará por tubos y cual lo hará por carcasa teniendo en cuenta distintos aspectos:

- T y P: El fluido con mayor temperatura y presión por tubos.
- Toxicidad: El fluido más tóxico por tubos.
- Viscosidad: El fluido más viscoso por carcasa.
- Caudal: El fluido con menor caudal por carcasa.
- Incrustaciones: El fluido más sucio tubos.
- Corrosión: El fluido más corrosivo por tubos.

En la tabla 11.6.1 se presentan las propiedades de la corriente a condensar que circula por tubos y del fluido refrigerante que lo hace por carcasa. Las propiedades se han estimado con AspenHysys.

Tabla 11.6.1 – Propiedades de los fluidos de carcasa y de tubos.

DATOS DE OPERACIÓN Y DISEÑO	CARCASA		TUBOS	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
Fluido	Agua refrigeración		Fluido de proceso	
Fase	L	L	V	L
Caudal másico total (Kg/h)	727013,78	727013,78	58591	58591
Temperatura (°C)	30	40	44,69	40,57
Presión trabajo (Pa)	1,01E5	1,01E5	4,00E4	4,00E4
Densidad (Kg/m ³)	1007,33	999,77	0,606	777,9
Viscosidad (Pa·s)	7,97E-4	6,15E-4	6,36E-6	2,85E-4
Calor específico (J/Kg·°C)	4706	4227	1337	2705
Conductividad (W/m·°C)	0,618	0,632	1,368E-2	0,238
Calor latente (J/kg)	2,214E6	2,214E6	1,104E6	1,075E6

2. Balance térmico

Hay que cumplir el balance de energía, el calor de tubos tiene que ser igual al de carcasa con el signo cambiado. Cuando no haya cambio de fase se eliminará el término que contiene el calor latente de la mezcla.

$$q \text{ (KW)} = m_t \cdot Cp_t \cdot (T_1 - T_2) + m_t \cdot \lambda = m_s \cdot Cp_s \cdot (T_1 - T_2) + m_s \cdot \lambda \quad (\text{Ec. 11.6.1})$$

El calor de condensación de tubos vendrá definido por el proceso y se ha determinado usando AspenHysys o AspenPlus. Fijando las temperaturas de trabajo de líquido refrigerante se calculará el caudal necesario para cumplir el balance de materia.

Para el caso de C301:

$$q_t = 9020,38 \text{ KW determinada con Aspen}$$

$$q_s = m_s \cdot \frac{4,706 + 4,227}{2} \cdot (40 - 30) + m_s \cdot \lambda$$

Igualando q_t y q_s se determina el caudal necesario de refrigerante:

$$m_s = 201,96 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 727042,83 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

3. DTML contracorriente

Para todos los intercambiadores se ha escogido circulación de fluidos en contracorriente.

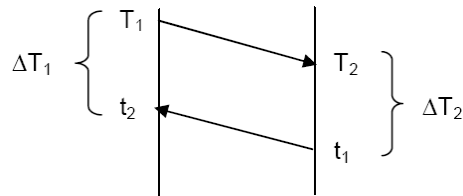


Figura 11.6.1 – Esquema temperaturas circulación en contracorriente

La diferencia de temperatura media logarítmica se calcula:

$$DTML (^{\circ}C) = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (\text{Ec. 11. 6. 2})$$

DTML = diferencia de temperatura media logarítmica ($^{\circ}C$)

Para el caso de C301:

$$DTML (^{\circ}C) = \frac{(40,57 - 30) - (34,69 - 30)}{\ln \frac{(40,57 - 30)}{(34,69 - 30)}} = 7,24 ^{\circ}C$$

a. Decisión del número de pasos por carcasa y por tubos

Se fija 1 paso por tubo y carcasa para la primera iteración.

Si el número de pasos es mayor a uno es necesario corregir la DTML mediante la siguiente expresión:

$$(DTML)_{Corregida} = DTML \cdot F \quad (\text{Eq. 11. 6. 3})$$

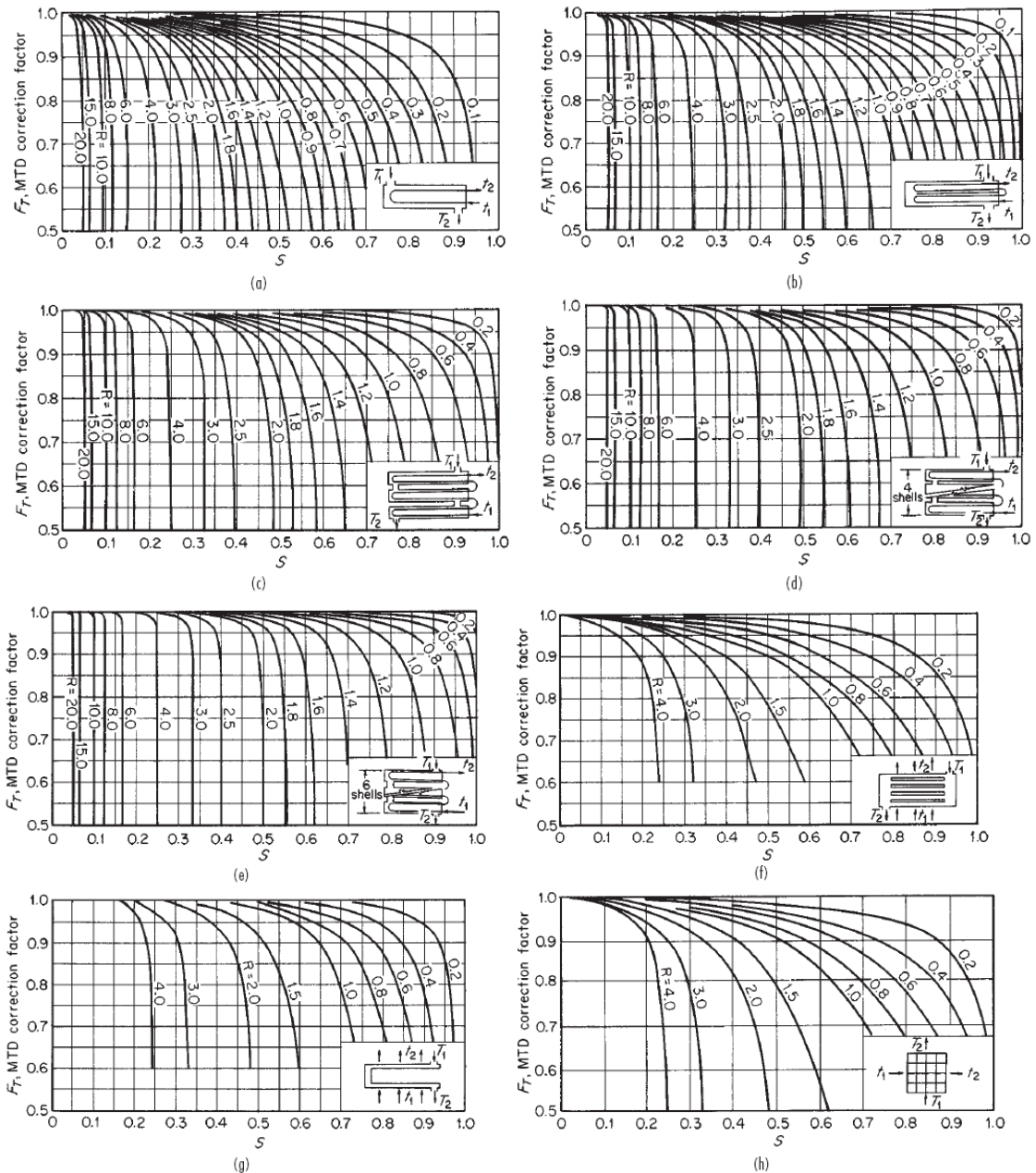
F es un factor de corrección que se evalúa gráficamente (figura 11.6.2). Es función del número de pasos por carcasa y por tubos y de las temperaturas de entrada y salida del intercambiador. Por un solo paso de tubo y por carcasa no se tiene que corregir.

11. Manual de cálculo

Si $F > 0,85$ Corregir DTML

Si $F < 0,85$ Aumentar el número de pasos por carcasa

El número de pasos por tubos puede variar de 1 a 16. Si tenemos más de un paso por carcasa el número de pasos por tubos mínimo es el valor del número de pasos por carcasa multiplicado por dos.



LMTD correction factors for heat exchangers. In all charts, $R = (T_1 - T_2)/(t_2 - t_1)$ and $S = (t_2 - t_1)/(T_1 - t_1)$. (a) One shell pass, two or more tube passes. (b) Two shell passes, four or more tube passes. (c) Three shell passes, six or more tube passes. (d) Four shell passes, eight or more tube passes. (e) Six shell passes, twelve or more tube passes. (f) Cross-flow, one shell pass, one or more parallel rows of tubes. (g) Cross-flow, two passes, two rows of tubes; for more than two passes, use $F_T = 1.0$. (h) Cross-flow, one shell pass, one tube pass, both fluids unmixed

Figura 11.6.2 – Corrección DTML (Perry, 1999)

Para el caso de C301:

Los condensadores de cabeza de columna la DTML no se corrige ya que en todos se usa un paso tanto por tubos como por carcasa.

4. Selección del intercambiador

a. Suposición coeficiente global inicial

Se parte de un valor inicial de U [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] obtenido a partir de datos bibliográficos (tabla 11.6.2) en función de los fluidos que circulan.

Tabla 11.6.2 – Coeficientes globales de transmisión de calor típicos (R.K. Sinnott. 2005)

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

En el caso de los condensadores usando agua como fluido frío para la condensación de vapores orgánicos $700 - 1000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. La U supuesta del condensador C301 es de $985 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, de modo que se encuentra dentro el rango especificado.

b. Cálculo de la área total de intercambio

$$A \text{ (m}^2\text{)} = \frac{q}{U \cdot DTML} \quad (\text{Ec. 11.6.4})$$

$U =$ coeficiente de transmisión de calor global ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

$A =$ Área de intercambio (m^2)

Para el caso de C301:

$$A = \frac{9,020E6}{985 \cdot 7,32} = 1265,72 \text{ m}^2$$

c. Selección de las características de los tubos

Se fija la longitud (L), diámetro interno (D_I) y grosor (ΔX) de tubo a partir de los datos estándar; y se calcula el diámetro externo de tubo ($D_E = D_I + 2 \cdot \Delta X$).

$\Delta X =$ espesor tubo (m)

Los valores estándar de longitud de tubo en metros son 1,83/2,44/3,66/4,88/6,10/7,32 (R.K. Sinnott., 2005). Generalmente se usan tubos de diámetros pequeños ya que el equipo suele ser más económico y compacto. No obstante los tubos más anchos son más fáciles de limpiar por métodos mecánicos, se usarán para fluidos que tengan gran riesgo de producir incrustaciones. El diámetro interno de tubo y el grosor se fijan consultando la tabla 11.6.3, como norma general se usarán siempre tubos diámetro menor a 1 1/2". No obstante, estos parámetros hay que ajustar-los para que cumplan las relación L/D y las velocidades de circulación de los fluidos.

Tabla 11.6.3 – Valores de diámetro interno y grosor de tubos (McCabe 1991)

Diámetro exterior pulg	Espesor de pared		Diámetro interior cm	Área de la sección transversal de metal cm ²	Área de la sección interior dm ²	Circunferencia m, ϕ superficie m ² /m de longitud		Velocidad en m/seg para 1 litro/min	para la velocidad de 1 m/seg litros/min	Peso kg/m ³
	Núm. BWG	cm				Exterior	Interior			
5/8	12	0,277	1,034	1,142	0,00839	0,0499	0,0325	0,1993	5,038	0,896
	14	0,211	1,166	0,910	401068	0,0499	0,0366	0,1361	6,407	0,713
	16	0,165	1,257	0,735	0,01245	0,0499	0,0395	0,1343	7,446	0,377
	18	0,124	1,339	0,574	0,01403	0,0499	0,0421	0,1184	8,449	0,451
3/4	12	0,277	1,351	1,419	0,01431	0,0598	0,0425	0,1163	8,601	1,113
	14	0,211	1,483	1,123	0,01728	0,0598	0,0466	0,0965	10,36	0,88 1
	16	0,165	1,575	0,903	0,01951	0,0598	0,0495	0,0856	11,69	0,708
	18	0,124	1,656	0,697	0,02155	0,0598	0,0520	0,0774	12,92	0,346
7/8	12	0,277	1,669	1,690	0,02183	0,0698	0,0524	0,0762	13,13	1,326
	14	0,211	1,801	1,335	0,02546	0,0698	0,0366	0,0634	15,29	1,048
	16	0,165	1,892	1,065	0,02815	0,0698	0,0594	0,0593	16,87	0,835
	18	0,124	1,974	0,819	0,03057	0,0698	0,0620	0,0545	18,36	0,643
1	10	0,340	1,859	2,348	0,02713	0,0798	0,0584	0,0614	16,29	1,841
	12	0,277	1,986	1,968	0,03103	0,0798	0,0624	0,0538	18,59	1,543
	14	0,211	2,118	1,542	0,03521	0,0798	0,0665	0,0473	21,14	1,210
	16	0,165	2,210	1,232	0,03837	0,0798	0,0694	0,0435	23,02	0,966
1 1/4	10	0,340	2,494	3,032	0,04887	0,0997	0,0784	0,0341	29,3 1	2,378
	12	0,277	2,621	2,523	0,05398	0,0997	0,0824	0,0309	32,37	1,978
	14	0,211	2,753	1,961	0,05955	0,0997	0,0865	0,0280	35,72	1,537
	16	0,165	2,845	1,561	0,06355	0,0997	0,0894	0,0262	38,14	1,225
1 1/2	10	0,340	3,129	3,710	0,07692	0,1197	0,0983	0,0217	46,14	2,909
	12	0,277	3,256	3,071	0,08324	0,1197	0,1023	0,0200	49,96	2,408
	14	0,211	3,388	2,387	0,09021	0,1197	0,1064	0,0185	54,09	1,872
2	10	0,340	4,399	5,068	0,15236	0,1596	0,1382	0,0110	91,19	3,988
	12	0,277	4,526	4,177	0,16072	0,1596	0,1422	0,0104	96,53	3,304

En el caso del intercambiador C301, después de varias iteraciones sé fijó:

$$L = 7,32 \text{ m}$$

$$D_I = 0,01575 \text{ m}$$

$$\Delta X = 0,00165 \text{ m}$$

$$D_E = 0,01905 \text{ m}$$

d. Distribución de los tubos

El pitch es la distancia entre los centros de dos tubos consecutivos. Como se puede ver en la figura 11.6.3, el pitch puede ser triangular, cuadrado o romboidal.

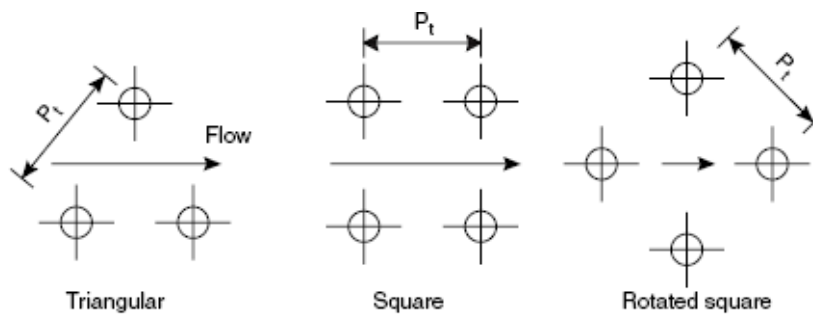


Figura 11.6.3 – Distribución de los tubos (R.K. Sinnott, 2005)

La disposición de tubos triangular y romboidal proporcionan altas velocidades de transferencia de calor, en cambio la pérdida de presión es alta en comparación con la cuadrada. El pitch cuadrado se usa cuando se necesita una limpieza mecánica del lado de la carcasa.

Se escoge una disposición triangular para todos los intercambiadores de carcasa y tubos. Para disposición triangular, el pitch se calcula:

$$Pitch = 1,25 \cdot D_E \quad (\text{Ec. 11.6.5})$$

$D_E =$ diámetro externo tubo (m)

Para el caso de C301:

$$Pitch = 1,25 \cdot 0,01905 = 0,02381 \text{ m}$$

e. Cálculo del número de tubos

Lógicamente el número de tubos tiene que ser un número entero.

$$N_t = \frac{A}{A_{1 \text{ tubo}}} = \frac{A}{\pi \cdot D_E \cdot L} \quad (\text{Ec. 11.6.6})$$

$L =$ longitud de tubos (m)

$N_t =$ número de tubos

Para el caso de C301:

$$N_t = \frac{1265,72}{\pi \cdot 0,01905 \cdot 7,32} = 2889,23 \approx 2890 \text{ tubos}$$

f. Cálculo del diámetro del haz de tubos y carcasa

Para calcular el diámetro de carcasa se suma el diámetro del haz de tubos y el espacio entre el haz y la pared externa de la carcasa, que dependerá básicamente del tipo de carcasa usado. Se escoge un tipo de carcasa tipo T (Pull-trough floating head), ya que al ser un cabezal flotante permite que haya expansión térmica sin problemas, permite sacar el haz de tubos para limpieza y son los más versátiles.

Seguidamente se calcula el diámetro del haz de tubos mediante la siguiente expresión, donde K_1 y n_1 son valores tabulados en función del número de pasos (tabla 11.6.4).

$$D_b = D_E \cdot \left(\frac{N_t}{K_1}\right)^{1/n_1} \quad (\text{Ec. 11.6.7})$$

$D_b =$ diámetro haz de tubos (m)

Tabla 11.6.4 – Factores para el cálculo de D_b en función del tipo de pitch (R.K. Sinnott. 2005)

Triangular pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
n_1	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Square pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

A partir de D_b y del tipo de carcasa elegido se determina gráficamente $D_s - D_b$ (figura 11.6.4), pudiendo determinar el diámetro de carcasa.

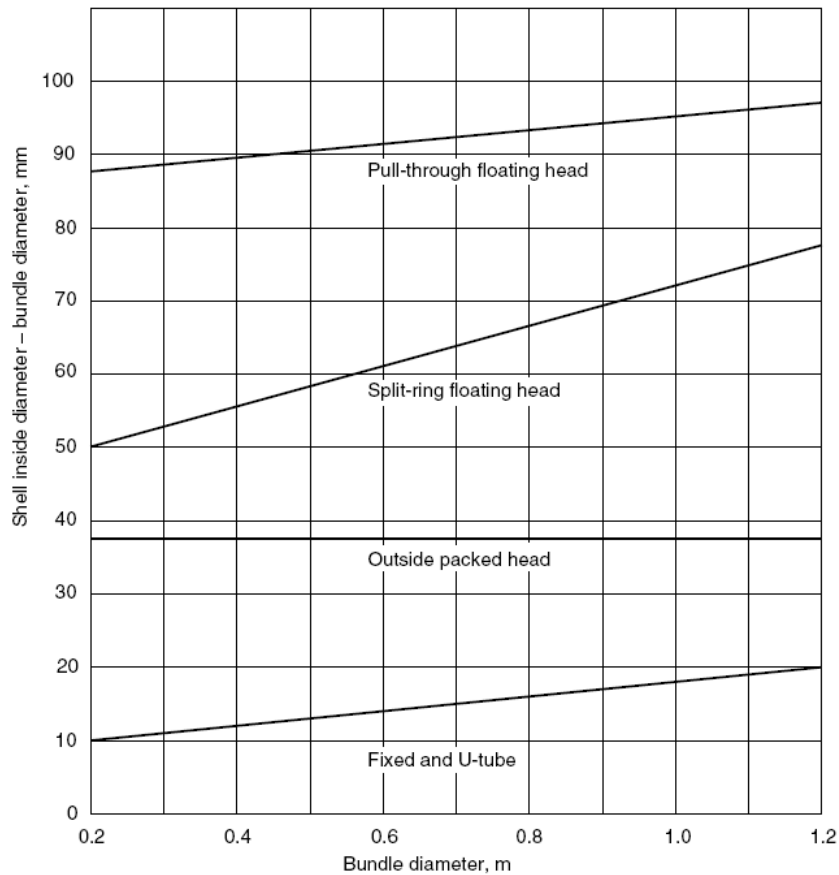


Figura 11.6.4 – Relación diámetro carcasa/diámetro haz de tubos (R.K. Sinnott. 2005).

Según la norma TEMA (American Tubular Heat Exchanger Manufacturers Association), el diámetro de carcasa tiene un valor de 0,15 a 1,5 m. Hasta los 0,61 m la construcción con tubería estándar.

Para el caso de C301:

$$D_B = 0,01905 \cdot \left(\frac{2890}{0,319}\right)^{1/2,142} = 1,34 \text{ m}$$

Figura 11.5.3: $D_s = 0,1 + D_B = 1,44 \text{ m}$

$D_s = \text{diámetro interno carcasa (m)}$

g. Comprobación de la relación L/D_s

Se comprueba que el cociente entre la longitud de tubos y el diámetro de carcasa esté entre 4 y 6. Si $L/D_s < 4$ se supone un valor de L mayor y si $L/D_s > 6$ se supone un valor de L menor. En ambos casos hay que recalcular D_B y D_s .

Para el caso de C301:

$$L/D_s = 7,32/1,44 = 5,08$$

h. Selección del número de pasos por tubo mediante velocidades típicas de circulación per tubos

Se calcula la velocidad de paso de fluido por tubos:

$$V_t \text{ (m/s)} = \frac{m_t}{\rho \cdot A_{\text{paso tubo}} \cdot N_{tp}} = \frac{m_t}{\rho \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D_I^2\right) \cdot \left(\frac{N_t}{n_{pt}}\right)} \quad (\text{Ec. 11.6.8})$$

$A_{\text{paso tubo}}$ = Area de paso de un tubo (m^2)

N_{tp} = número de tubos por cada paso

D_I = diámetro interno tubo (m)

La velocidad obtenida se compara con valores de velocidades típicos de la bibliografía (R.K. Sinnott., 2005).

- Líquido por tubos: entre 1 y 2 m/s, máximo 4 m/s. Si el fluido es agua entre 1,5 y 2,5 m/s.
- Vapores: depende de la presión de operación y densidad del gas. En el rango siguiente, los valores más bajos corresponden a los vapores de peso molecular más alto.
 - Vacío: 50 – 80 m/s
 - Presión atmosférica: 10-30 m/s
 - Alta presión: 5 – 13 m/s

Si ésta no está dentro el rango típico se puede modificar el diámetro interno de tubo, o bien recalculer el número de paso de tubos utilizando velocidades de la bibliografía con la siguiente expresión.

$$N_{tp} = \frac{m_t}{\rho \cdot A_{paso\ tubo} \cdot V_{bibliografia}} \quad (\text{Ec. 11. 6. 9})$$

$$n_{pt} = \frac{N_t}{N_{tp}} \quad (\text{Ec. 11. 6. 10})$$

El número de pasos por tubo debe ser par, de modo que si es necesario se redondeará. Si se modifica el número de pasos se tendrá que revisar la DTML mediante F.

Para el caso de C301:

$$V_t = \frac{58591 \cdot \left(\frac{1}{3600}\right)}{0,606 \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 0,01575^2\right) \cdot \left(\frac{2890}{1}\right)} = 47,7 \text{ m/s}$$

i. Determinación del número de pantallas deflectoras y separación entre ellas

Se instalarán pantallas (baffle) segmentadas simples horizontales. Las pantallas sirven para generar flujo turbulento e incrementar así el intercambio de calor.

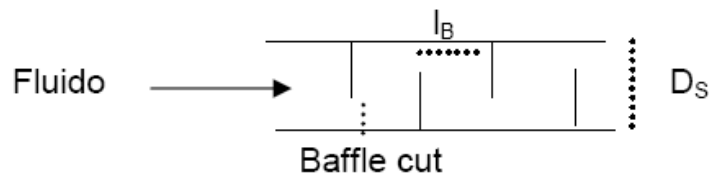


Figura 11.6.5 – Esquema pantallas deflectoras

Altura libre de pantalla (baffle cut) es el espacio que queda entre la pantalla y la carcasa. Se determina multiplicando el diámetro de carcasa por un factor de 0,15 a

0,45. El espacio entre pantallas (I_B) se determina multiplicando por un valor entre 0,2 y 1 el diámetro de carcasa.

El número de pantallas (N_B) se calcula:

$$N_B = \frac{L}{I_B} - 1 \quad (\text{Ec. 11. 6. 11})$$

I_B = espacio entre pantallas deflectoras (m)

N_B = número de pantallas deflectoras

Se redondea para que sea un número entero. Cuanto mayor sea el número de pantallas mayor será la pérdida de presión por carcasa.

Para el caso de C301:

$$I_B = 0,55 \cdot 1,44 = 0,792 \text{ m}$$

$$N_B = \frac{7,32}{0,792} - 1 = 8,24 \approx 9 \text{ pantallas}$$

j. Comprobación de la velocidad por carcasa

Se calcula la velocidad de paso de fluido por carcasa:

$$V_s = \frac{m_s}{\rho \cdot A_{st}} \quad (\text{Ec. 11. 6. 12})$$

A_{st} = Área transversal de la carcasa

El área transversal de carcasa se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_{st} = \frac{I_B \cdot D_S \cdot (\text{pitch} - D_E)}{\text{pitch} \cdot n_{ps}} \quad (\text{Ec. 11. 6. 13})$$

La velocidad obtenida se compara con valores de velocidades típicos de la bibliografía (R.K. Sinnott.,2005).

- Líquido por carcasa: entre 0,3 y 1 m/s.

- Vapores: depende de la presión de operación y densidad del gas. En el rango siguiente, los valores más bajos corresponden a los vapores de peso molecular más alto.
 - Vacío: 50 – 70 m/s
 - Presión atmosférica: 10-30 m/s
 - Alta presión: 5 – 10 m/s

Para el caso de C301:

$$A_{st} = \frac{0,792 \cdot 1,44 \cdot (0,02381 - 0,01905)}{0,02381 \cdot 1} = 0,228 \text{ m}^2$$

$$V_s = \frac{727013,78 \cdot \left(\frac{1}{3600}\right)}{1007,33 \cdot 0,228} = 0,88 \text{ m/s}$$

5. Determinación de la U del intercambiador a partir del cálculo de los coeficientes y factores de ensuciamiento

Para calcular la U primero hay que determinar los coeficientes individuales de transferencia de calor. Seguidamente se presentan las diferentes formas de calcularlo para los casos sin cambio de fase en el lado de tubos, sin cambio de fase en el lado de carcasa, para condensación y para evaporación.

En las tabla 11.6.5 y 11.6.6 se puede comprobar si el valor del coeficiente individual esta dentro el rango típico.

Tabla 11.6.5 – Coeficientes individuales de transmisión de calor típicos (McCabe, 1991)

Tipo de procesos	Intervalo de valores de h	
	Btu/pt ² -h-°F	W/m ² -°C
Vapor de agua (condensación en gotas)	5000-20000	30000-100000
Vapor de agua (condensación en película)	1000-3000	6000-20000
Ebullición de agua	300-9000	1700-50000
Condensación de vapores orgánicos	200-400	1000-2000
Agua (calentamiento o enfriamiento)	50-3000	300-20000
Aceites (calentamiento o enfriamiento)	10-300	50-1500
Vapor de agua (sobrecalentamiento)	5-20	30-100
Aire (calentamiento o enfriamiento)	42-10	1-50

Tabla 11.6.6 – Coeficientes individuales de transmisión de calor típicos.

	Film Coefficient, Btu/hr. (ft ²)(°F)	W/m ² .°C
No Change of Phase		
Water	300-2000	1500 - 12000
Gases	3-50	15 - 300
Organic solvents	60-500	250 - 3000
Oils	10-120	50 - 700
Condensing		
Steam	1000-3000	5000 - 18000
Organic solvents	150-500	750 - 3000
Light oils	200-400	1000 - 2400
Heavy oils (vacuum)	20-50	100 - 300
Ammonia	500-1000	2500 - 6000
Evaporation		
Water	800-2000	4000 - 12000
Organic solvents	100-300	500 - 1800
Ammonia	200-400	750 - 1800
Light oils	150-300	50 - 300
Heavy oils	10-50	1000 - 2400

a. Coeficiente individual del lado de tubos sin cambio de fase

$$Nu = j_h \cdot Re \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (\text{Ec. 11.6.14})$$

Dónde:

$$n^\circ \text{ de Nusselt} \quad Nu_t = \frac{h_t \cdot D_i}{k} \quad (\text{Ec. 11.5.15})$$

$$n^\circ \text{ de Reynolds} \quad Re_t = \frac{D_i \cdot G_t}{\mu} = \frac{D_i \cdot \frac{m_t}{A_{\text{paso tubo}} \cdot \left(\frac{N_t}{n_{pt}}\right)}}{\mu} \quad (\text{Ec. 11.6.16})$$

$$n^{\circ} \text{ de Prandtl } Pr_t = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (\text{Ec. 11.6.17})$$

j_h = factor de calor

k_L = conductividad térmica del líquido ($W/m \cdot ^{\circ}C$)

h = coeficiente individual de transmisión de calor ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)

El factor de transferencia de calor (j_h) se determina gráficamente en función del número de Reynolds (figura 11.6.6).

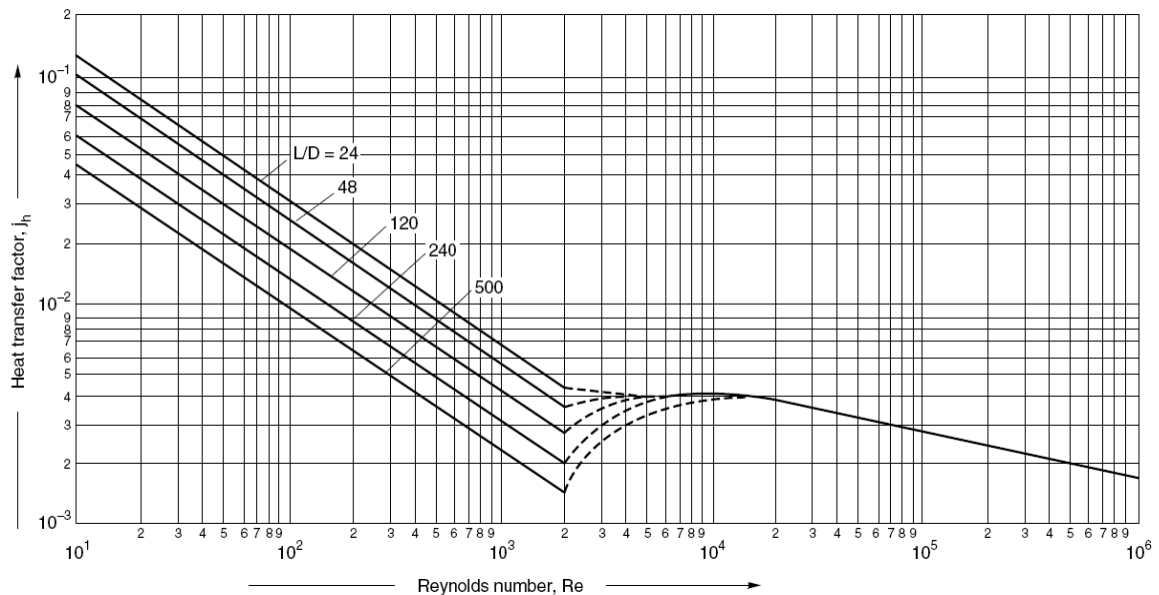


Figura 11.6.6 – Determinación transferencia de calor J_h del lado de tubos (R.K. Sinnott.,2005)

Si el número de Reynolds es mayor a 10000 se puede calcular con la expresión:

$$j_h = 0,027 \cdot Re_t^{-0,2} \quad (\text{Ec. 11.6.18})$$

La viscosidad en la pared (μ_w) se estima con AspenHysys a partir de la temperatura de la pared (t_w) que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$h_{t,aprox} \cdot (t_w - t) = U \cdot (T - t) \quad (\text{Ec. 11.6.19})$$

t_w = temperatura de la pared ($^{\circ}C$)

$h_{t,aprox}$ se calcula usando aproximando la viscosidad de la pared a la viscosidad del fluido a la temperatura interior del tubo.

$$\frac{h_{t,aprox} \cdot D_i}{k} = j_h \cdot Re \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (\text{Ec. 11. 6. 20})$$

b. Coeficiente individual del lado de carcasa sin cambio de fase

$$Nu = j_h \cdot Re \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (\text{Ec. 11. 6. 21})$$

Dónde:

$$n^{\circ} \text{ de Nusselt} \quad Nu_s = \frac{h_s \cdot D_{eq}}{k} \quad (\text{Ec. 11. 6. 22})$$

$$\text{para pitch triaangular} \quad D_{eq} = \frac{1,10}{D_E} \cdot (\text{pitch}^2 - 0,917 \cdot D_E^2) \quad (\text{Ec. 11. 6. 23})$$

$$n^{\circ} \text{ de Reynolds} \quad Re_s = \frac{D_{eq} \cdot G_s}{\mu} = \frac{D_{eq} \cdot m_s}{A_{st} \cdot \mu} \quad (\text{Ec. 11. 6. 24})$$

$$n^{\circ} \text{ de Prandtl} \quad Pr_s = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (\text{Ec. 11. 6. 25})$$

El factor de transferencia de calor (j_h) se determina gráficamente en función del baffle cut y el número de Reynolds (figura 11.6.7).

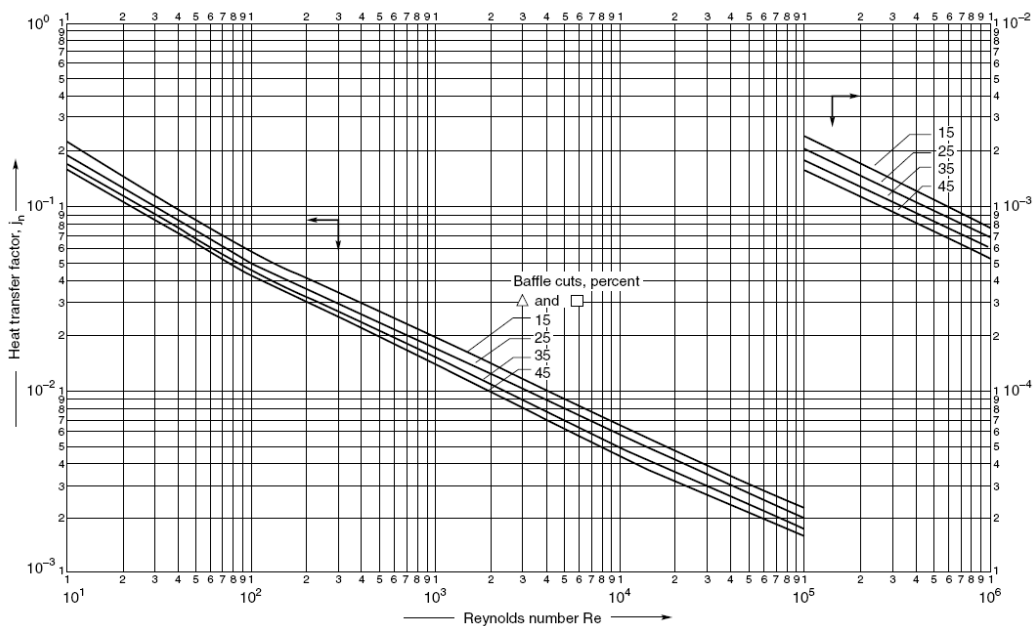


Figura 11.6.7 – Determinación factor de transferencia de calor J_h del lado de carcasa para baffles segmentados (R.K. Sinnott., 2005)

Para el caso de C301:

$$D_{eq} = \frac{1,10}{0,01905} \cdot (0,02381^2 - 0,917 \cdot 0,01905^2) = 0,01352$$

$$Re_s = \frac{0,01352 \cdot \frac{727013,78/3600}{0,228}}{7,97E - 4} = 15014$$

$$Pr_s = \frac{4706 \cdot 7,97E - 4}{0,618} = 6,07$$

$$j_h = 3,6E - 3$$

$$T_W = 41, \quad \mu_W = 6,274E - 4$$

$$h_s = \frac{\left(3,6E - 3 \cdot 15014 \cdot 6,07^{0,33} \cdot \left(\frac{7,97E - 4}{6,274E - 4} \right)^{0,14} \right) \cdot 0,618}{0,01352} = 4630 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

En el caso de calentar de agua va de 300 a 20000 W/m²·°C (tabla 11.6.4).

c. Condensación interior tubos horizontales

Cuando la condensación se da en el interior de tubos dispuestos de forma horizontal, el coeficiente de intercambio se puede estimar con la siguiente expresión:

$$h_t = 0,76 \cdot k_L \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot g}{\mu_L \cdot \Gamma} \right)^{1/3} = 0,76 \cdot k_L \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot 9,81}{\mu_L \cdot (m_{condensado}/(N_t \cdot L))} \right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 11.6.26})$$

Γ = caudal másico condensado por metro de tubo (kg/m · s)

Para el caso de C301:

$$h_t = 0,76 \cdot 0,238 \cdot \left(\frac{778 \cdot (778 - 0,606) \cdot 9,81}{2,85E - 4 \cdot \left(\frac{58591}{3600 \cdot (2890 \cdot 7,32)} \right)} \right)^{1/3} = 5428 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

En condensación de vapor el coeficiente va de 5000 a 20000 W/m²·°C y para orgánicos de 1000 a 3400 W/m²·°C (tabla 11.6.5 y 11.6.6).

d. Condensación exterior tubos horizontales

Cuando la condensación se da en el exterior de tubos dispuestos de forma horizontal, el coeficiente de intercambio se puede estimar con la siguiente expresión.

$$h_t = 0,95 \cdot k_L \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot g}{\mu_L \cdot \Gamma} \right)^{1/3} = 0,95 \cdot k_L \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot 9,81}{\mu_L \cdot (m_{condensado} / (N_t \cdot L))} \right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 11.6.27})$$

Cálculo de la U global

$$\frac{1}{U_{calculada}} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_{Rs}} + \frac{D_E \cdot \ln \left(\frac{D_E}{D_I} \right)}{2 \cdot k_{acero}} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{h_t} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{h_{Rt}} \quad (\text{Ec. 11.6.28})$$

k_{acero} = conductividad térmica del acero ($W/m \cdot ^\circ C$)

$k_{acero} = 16,3$ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A partir de la tabla 11.6.7 se fijan los factores de ensuciamiento necesarios para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor.

Tabla 11.6.7 – Factores típicos de ensuciamiento (R.K. Sinnott.,2005)

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

Para el caso de C301:

$$\frac{1}{U_{calculada}} = \frac{1}{4630} + \frac{1}{4500} + \frac{0,01905 \cdot \ln \left(\frac{0,01905}{0,01575} \right)}{2 \cdot 16,3} + \frac{0,01905}{0,01575} \cdot \frac{1}{5428} + \frac{0,01905}{0,01575} \cdot \frac{1}{5000}$$

$$U_{calculada} = 988 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Se fija que la U global supuesta puede ser un 15% menor respecto a la U calculada, es decir, que el intercambiador estará como máximo un 15% sobredimensionado. Si está fuera de este margen se repite el proceso de diseño.

6. Cálculo de las pérdidas de presión

a. Lado de tubos con cambio de fase

Las pérdidas de presión debido a la fricción para un sistema isoterma (con cambio de fase) se estiman con la siguiente expresión:

$$\Delta P = 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho \cdot V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{L}{D_t}\right) \quad (\text{Ec. 11.6.29})$$

j_f = factor de fricción

El factor de fricción (j_f) se determina con la figura 11.6.8 y el Reynolds de tubos (Ec. 11.6.16).

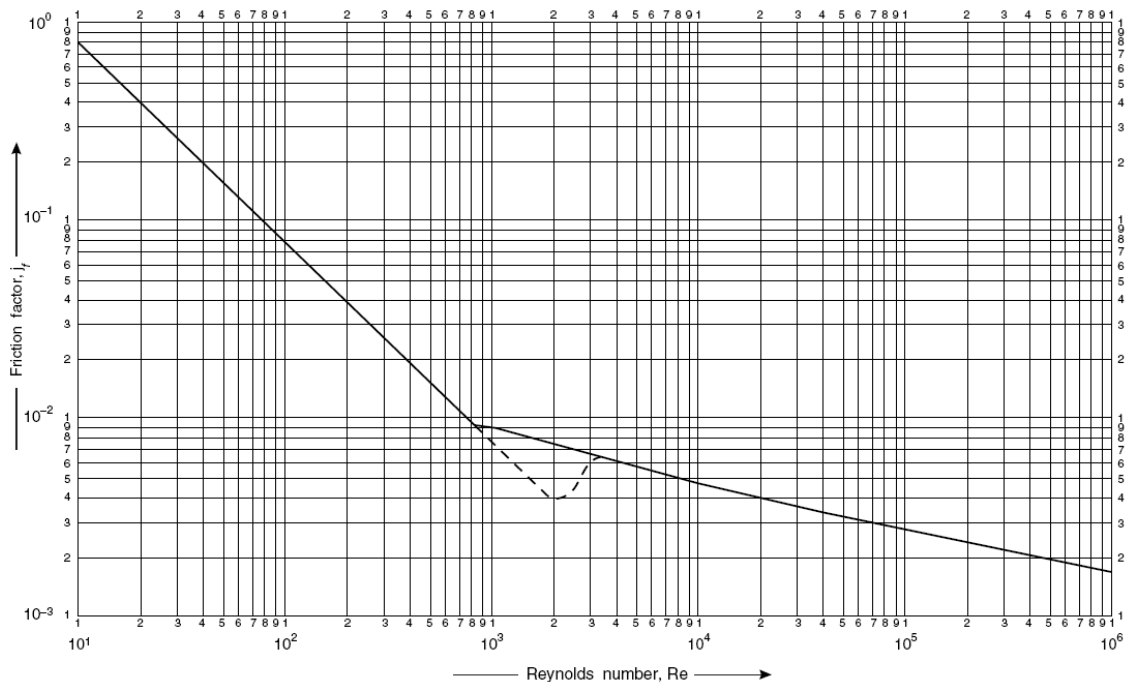


Figura 11.6.8 – Determinación del factor de fricción J_f del lado de los tubos (R.K. Sinnott.,2005)

Para el caso de C301:

$$Re_t = \frac{0,01575 \cdot \frac{58591/3600}{\left(\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 0,01575^2\right) \cdot 2890}}{6,36E - 6} = 71593$$

$$j_f = 0,0029$$

$$\Delta P = 8 \cdot 0,0029 \cdot \frac{0,606 \cdot 47,7^2}{2} \cdot \left(\frac{7,32}{0,01575}\right) = 7436 \text{ Pa}$$

b. Lado de tubos sin cambio de fase

$$\Delta P = 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho \cdot V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{L}{D_I}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-m} \quad (\text{Ec. 11. 6. 30})$$

$$m = 0,25 \text{ si } Re_t < 2100, \quad m = 0,14 \text{ si } Re_t > 2100$$

c. Lado de carcasa

Las pérdidas de presión se calculan,

$$\Delta P = n_s \cdot 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho \cdot V_s^2}{2} \cdot \left(\frac{D_s}{D_{eq}}\right) \cdot \left(\frac{L}{I_B}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0,14} \quad (\text{Ec. 11. 6. 31})$$

n_s = número de pasos por carcasa

El factor de fricción (j_f) se determina con la figura 11.6.9 y el Reynolds de carcasa (Ec. 11.6.24).

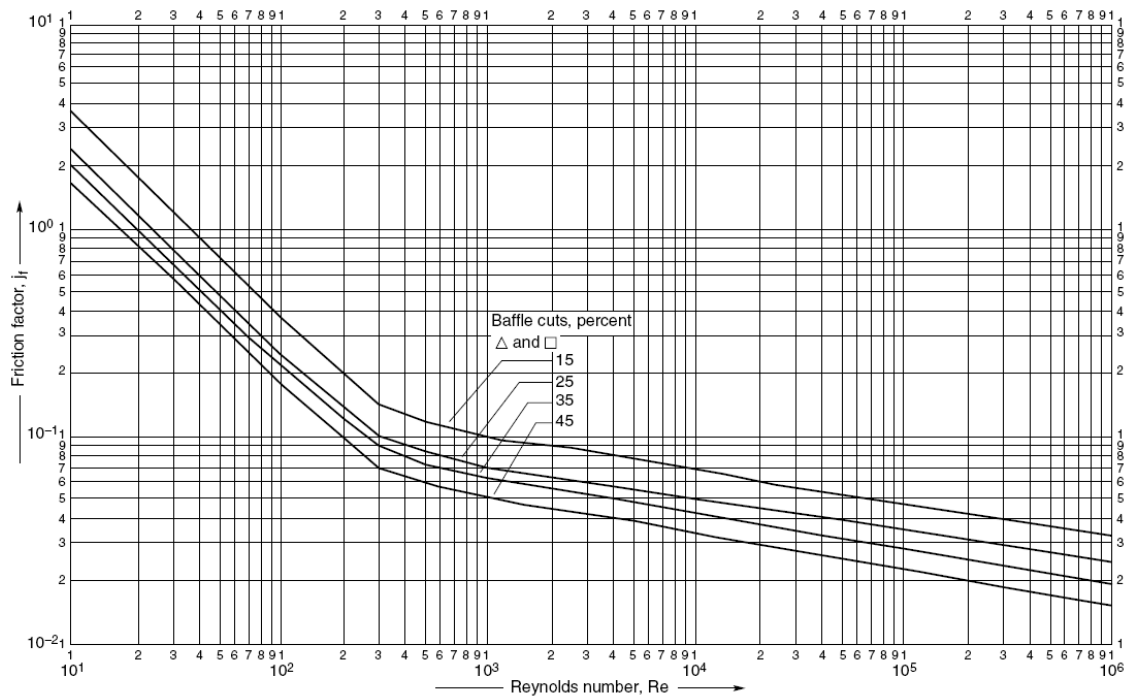


Figura 11.6.9 – Determinación del factor de fricción J_f del lado de carcasa (R.K. Sinnott.,2005)

Para el caso de C301:

$$Re_s = 15014$$

$$j_f = 0,03$$

$$\Delta P = 1 \cdot 8 \cdot 0,03 \cdot \frac{1007 \cdot 0,88^2}{2} \cdot \left(\frac{1,44}{0,0135}\right) \cdot \left(\frac{7,32}{0,792}\right) \cdot \left(\frac{7,97E - 4}{6,27E - 4}\right)^{-0,14} = 88716 \text{ Pa}$$

11.6.2.- Kettle-reboilers

El método de diseño de los kettle-reboiler es similar al de intercambiadores de carcasa y tubos. Solamente presenta algunas diferencias en correlaciones debido a sus características especiales como son las dimensiones de la carcasa o los tubos en U. Seguidamente se presenta el proceso de diseño seguido para los intercambiadores K301, K302, K501, K502, K601, K602 y K701.

Se ha realizado un cálculo de muestra con el intercambiador K301.

1. Objetivo del intercambiador

El primer paso de diseño es caracterizar las corrientes. Hay que definir que fluido refrigerante o calefactor se va a usar, y a que temperatura va a operar. El fluido de colas de columna circula por la carcasa y el vapor lo hace por tubos.

En la tabla 11.6.8 se presentan las propiedades de la corriente de colas de la columna y el vapor que condensa. Las propiedades se han estimado con AspenHysys.

Tabla 11.6.8 – Propiedades de los fluidos de carcasa y de tubos.

DATOS DE OPERACIÓN Y DISEÑO	CARCASA		TUBOS	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
Fluido	Fluido de proceso		Vapor a baja P	Condensados
Fase	L	L	V	L
Caudal másico total (Kg/h)	199609,14	199609,14	36744,31	36744,31
Caudal vapor (Kg/h)	-	35292,8	36744,31	-
Caudal líquido (Kg/h)	199609,14	164316,54	-	36744,31
Temperatura (°C)	66,34	74,99	152	150
Presión trabajo (Pa)	4,00E4	4,00E4	5,00E5	5,00E5
Densidad 1 (Kg/m ³)	962,1	0,273 (gas)	2,614	902
Densidad 2 (Kg/m ³)	-	966,8 (líquido)	-	-
Viscosidad 1 (Pa·s)	4,38E-4	8,47E-6 (gas)	1,40E-5	1,79E-4
Viscosidad 2 (Pa·s)	-	3,94E-4 (líquido)	-	-
Calor específico 1 (J/Kg·°C)	4127	1826 (gas)	1969	4323
Calor específico 2 (J/Kg·°C)	-	4187 (líquido)	-	-
Conductividad 1 (W/m·°C)	0,646	2,134E-2 (gas)	2,877E-2	0,686
Conductividad 2 (W/m·°C)	-	0,665 (líquido)	-	-
Calor latente (J/kg)	2199	2195	2,107E6	2,107E6

1. Balance térmico

En el balance de energía se considerará el calor latente del cambio de fase que tiene lugar en la carcasa y en los tubos.

$$q \text{ (KW)} = m_t \cdot Cp_t \cdot (T_1 - T_2) + m_t \cdot \lambda = m_s \cdot Cp_s \cdot (T_1 - T_2) + m_s \cdot \lambda \quad (\text{Ec. 11.6.1})$$

El calor necesario para evaporar las colas de columna viene definido por el proceso y se ha determinado usando AspenHysys o AspenPlus. Sabiendo que el vapor saliente de la turbina de vapor es de 152°C y 5 bares se calcula el caudal necesario de vapor para cumplir el balance de materia.

Para el caso de K301:

$$q_t = 21557,7 \text{ KW determinada con Aspen}$$

$$q_s = m_s \cdot 2,552 \cdot (152 - 150) + m_s \cdot 2107$$

Igualando q_t y q_s se determina el caudal vapor necesario:

$$m_s = 10,207 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 36744,31 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

2. DTML contracorriente

$$DTML = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (\text{Ec. 11.6.2})$$

En los kettle-reboiler no es necesario corregir-la.

Para el caso de K301:

$$DTML \text{ (}^\circ\text{C)} = \frac{(152 - 66,34) - (150 - 74,99)}{\ln \frac{(152 - 66,34)}{(150 - 74,99)}} = 80,29 \text{ }^\circ\text{C}$$

3. Selección del intercambiador

a. Suposición coeficiente global inicial

Se parte de un valor inicial de U [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] obtenido a partir de datos bibliográficos (tabla 11.6.2) en función de los fluidos que circulan. Se adjunta también la siguiente tabla con datos bibliográficos de U de intercambiadores del tipo Kettle-reboiler.

Tabla 11.6.9 – Coeficientes globales de transmisión de calor típicos para kettle-reboilers (McCabe, 1991)

Servicio	Coeficiente global U	
	Btu-pie ² -h-°F	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
Productos orgánicos pesados	100-160	570-900
Hidrocarburos ligeros	160-220	900-1250
Agua y disoluciones acuosas	220-350	1250-2000

La U supuesta del K301 es de $800 W/m^2 \cdot ^\circ C$, de modo que aproximadamente se encuentra dentro el rango especificado.

b. Cálculo del área total de intercambio

$$A (m^2) = \frac{q}{U \cdot DTML} \quad (\text{Ec. 11.6.4})$$

Para el caso de K301:

$$A = \frac{2,156E7}{800 \cdot 80,29} = 335,63 m^2$$

c. Selección de las características de los tubos

Se fija la longitud (L), diámetro interno (D_I) y grosor (ΔX) de tubo a partir de los datos estándar; y se calcula el diámetro externo de tubo ($D_E = D_I + 2 \cdot \Delta X$). Los valores estándar de longitud de tubo en metros son 1,83/2,44/3,66/4,88/6,10/7,32 y las dimensiones de los tubos se consultan en la tabla 11.6.3.

En los kettle-reboiler se usan tubos en U.

En el caso del intercambiador K301:

$$L = 7,32 \text{ m}$$

$$D_I = 0,02845 \text{ m}$$

$$\Delta X = 0,00165 \text{ m}$$

$$D_E = 0,03175 \text{ m}$$

d. Distribución de los tubos

Se escoge una disposición de los tubos de forma triangular. El pitch se calcula,

$$Pitch = 1,25 \cdot D_E \quad (\text{Ec. 11. 6. 5})$$

Para el caso de K301:

$$Pitch = 1,25 \cdot 0,03175 = 0,03969 \text{ m}$$

e. Cálculo del número de tubos

Lógicamente el número de tubos tiene que ser un número entero.

$$N_t = \frac{A}{A_{1 \text{ tubo}}} = \frac{A}{\pi \cdot D_E \cdot L} \quad (\text{Ec. 11. 6. 6})$$

Se usan dos pasos por tubo así que el número de tubos tiene que ser divisible entre 2.

$$N'_t = \frac{N_t}{2} \quad (\text{Ec. 11. 6. 32})$$

Para el caso de K301:

$$N_t = \frac{335,63}{\pi \cdot 0,03175 \cdot 7,32} = 446,86 \approx 448 \text{ tubos}$$

$$N'_t = \frac{448}{2} = 224 \text{ tubos en U}$$

f. Cálculo del diámetro del haz de tubos y carcasa

El diámetro del haz de tubos, por distribución de tubos triangular y dos pasos por tubo se calcula mediante la siguiente expresión.

$$D_B = D_E \cdot \left(\frac{N_t}{0,249} \right)^{1/2,207} \quad (\text{Ec. 11.6.7})$$

Para el caso de K301:

$$D_B = 0,03175 \cdot \left(\frac{448}{0,249} \right)^{1/2,207} = 0,948 \text{ m}$$

En el caso de los kettle-reboiler, el diámetro de carcasa se calcula a partir de una relación. Éste debe ser entre 1,7 y 2 veces mayor al diámetro de haz de tubos.

Para el caso de K301:

$$D_S = 1,8 \cdot D_B = 1,8 \cdot 0,948 = 1,705 \text{ m}$$

Una vez determinado el diámetro de carcasa y el de haz de tubos, hay que fijar el nivel del líquido. Éste se sitúa entre 0.05 y 0.15 m por encima de la parte superior del haz de tubos. Hay que comprobar que el espacio libre encima el líquido (espacio de vapor o freeboard) sea mayor de 0,25 m. En la figura 11.6.10 se presenta el esquema de la sección transversal de un kettle-reboiler.

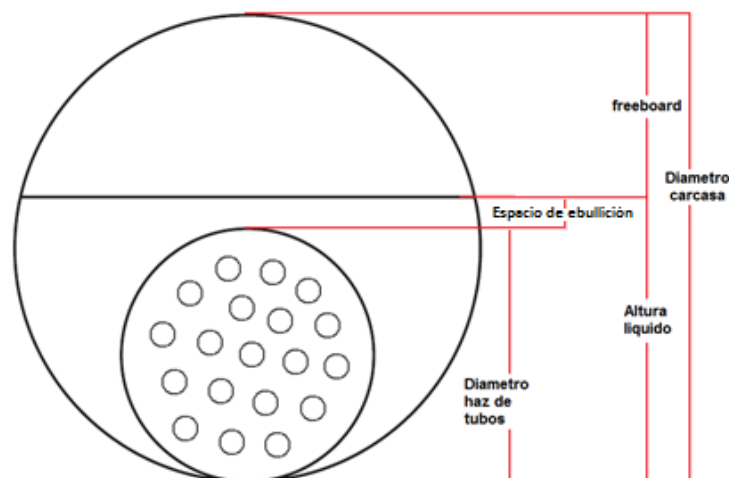


Figura 11.6.10 – Esquema de la sección transversal de un kettle-reboiler

Para el caso de K301:

$$D_B = 0,948 \text{ m}$$

$$D_S = 1,706 \text{ m}$$

$$\text{Espacio de ebullición} = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{Altura del líquido} = 0,948 + \text{espacio ebullición} = 1,048 \text{ m}$$

$$\text{Freeboard} = 1,706 - \text{altura líquido} = 0,658 \text{ m}$$

g. Comprobación de la relación L/D_S

Se comprueba que el cociente entre la longitud de tubos y el diámetro de carcasa esté entre 4 y 6. Si $L/D_S < 4$ se supone un valor de L mayor y si $L/D_S > 6$ se supone un valor de L menor. En ambos casos hay que recalcular D_B y D_S .

Para el caso de K301:

$$L/D_S = 7,32/1,705 = 4,29$$

h. Comprobación de la velocidad del vapor por carcasa

Hay que calcular la velocidad del vapor en la superficie de la carcasa. Para ello primero hay que determinar el área superficial del líquido. Éste área se calcula como el producto de la longitud por el ancho que ocupa el líquido. El ancho ocupado por el líquido se calcula:

$$A_{\text{superficial líquido}} = L \cdot \sqrt{(D_S^2 - \text{espacio ebullición}^2)} \quad (\text{Ec. 11.6.33})$$

$$V_s = \frac{m_{\text{vapor carcasa}}}{\rho_V \cdot A_{\text{superficial líquido}}} \quad (\text{Ec. 11.6.34})$$

Existe una velocidad máxima del vapor generado, a partir de la cual habrá arrastre del líquido. La relación para su cálculo es:

$$V_{s \text{ máx.}} = 0,2 \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{1/2} \quad (\text{Ec. 11.6.35})$$

Para el caso de K301:

$$V_s = \frac{35292,8/3600}{0,272 \cdot 7,32 \cdot \sqrt{(1,706^2 - 0,1^2)}} = 2,89 \text{ m/s}$$

$$V_{s \text{ máx.}} = 0,2 \cdot \left(\frac{962,1 - 0,272}{0,272} \right)^{1/2} = 11,89 \text{ m/s}$$

i. Comprobación de la velocidad de vapor por tubos

La velocidad del fluido que circula por tubos se calcula:

$$V_t \text{ (m/s)} = \frac{m_t}{\rho \cdot A_{\text{paso tubo}} \cdot N_{tp}} = \frac{m_t}{\rho \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot D_I^2 \cdot \left(\frac{N_t}{n_{pt}} \right)} \quad (\text{Ec. 11.6.8})$$

Para circulación de vapores a presión atmosférica la velocidad es de 10 – 30 m/s y alta presión de 5 – 10 m/s.

Para el caso de K301:

$$V_t = \frac{36744,31 \cdot \left(\frac{1}{3600} \right)}{2,614 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot 0,02845^2 \cdot \left(\frac{448}{1} \right)} = 13,57 \text{ m/s}$$

4. Determinación de la U del intercambiador a partir del cálculo de los coeficientes y factores de ensuciamiento

Para calcular la U primero hay que determinar los coeficientes individuales de transferencia de calor.

a. Coeficiente individual del lado de tubos

Para condensación en tubos horizontales, el coeficiente de intercambio se puede estimar con la expresión simplificada de la ecuación de Nusselt: (R.K. Sinnott. 2005).

$$h_t = 0,76 \cdot k_L \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot g}{\mu_L \cdot \Gamma} \right)^{1/3} = 0,76 \cdot k_L \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot 9,81}{\mu_L \cdot (m_{\text{condensado}} / (N_t \cdot L))} \right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 11.6.26})$$

Para el caso de K301:

$$h_t = 0,76 \cdot 0,238 \cdot \left(\frac{778 \cdot (778 - 0,606) \cdot 9,81}{2,85E - 4 \cdot \left(\frac{58591}{3600 \cdot (2890 \cdot 7,32)} \right)} \right)^{1/3} = 5428 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Para la condensación de vapor el coeficiente será de 5000 a 20000 W/m²·°C (tabla 11.6.5 y 11.6.6).

5. Coeficiente de convección del lado de carcasa

Una forma simple de estimar el coeficiente de intercambio del lado de carcasa es la ecuación de Mostinski (presión en Pa). (R.K. Sinnott. 2005)

$$h_s = 3,75E5 \cdot (P_c)^{0,69} \cdot \left(\frac{q}{A} \right)^{0,7} \cdot \left(1,8 \cdot \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0,17} + 4 \cdot \left(\frac{P}{P_c} \right)^{1,2} + 10 \cdot \left(\frac{P}{P_c} \right)^{10} \right) \quad (\text{Ec. 11. 6. 36})$$

Para el caso de K301:

$$h_s = 3,75E5 \cdot (2,21E6)^{0,69} \cdot \left(\frac{2,156E7}{335,63} \right)^{0,7} \cdot \left(1,8 \cdot \left(\frac{4E4}{2,21E6} \right)^{0,17} + 4 \cdot \left(\frac{4E4}{2,21E6} \right)^{1,2} + 10 \cdot \left(\frac{4E4}{2,21E6} \right)^{10} \right)$$

$$h_s = 3941 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

El coeficiente individual de transferencia de calor para soluciones acuosas que se evaporan es aproximadamente de 1700 a 12000 W/m²·°C.

6. Cálculo de la U de intercambiador

$$\frac{1}{U_{calculada}} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_{Rs}} + \frac{D_E \cdot \ln \left(\frac{D_E}{D_I} \right)}{2 \cdot k_{acero}} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{h_t} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{h_{Rt}} \quad (\text{Ec. 11. 6. 28})$$

$$k_{acero} = 16,3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

A partir de la tabla 11.6.7 se fijan los factores de ensuciamiento necesarios para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor.

Para el caso de K301:

$$\frac{1}{U_{calculada}} = \frac{1}{11553} + \frac{1}{5000} + \frac{0,03175 \cdot \ln\left(\frac{0,03175}{0,02845}\right)}{2 \cdot 16,3} + \frac{0,03175}{0,02845} \cdot \frac{1}{3941} + \frac{0,03175}{0,02845} \cdot \frac{1}{2500}$$

$$U_{calculada} = 813 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

Se fija que la U global supuesta puede ser un 15% menor respecto la U calculada, es decir que el intercambiador estará como máximo un 15% sobredimensionado. Si está fuera de este margen se repite el proceso de diseño.

7. Cálculo de las pérdidas de presión por tubos

Las pérdidas de presión debido a la fricción para un sistema isoterma (con cambio de fase) se estiman con la siguiente expresión:

$$\Delta P = 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho \cdot V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{L}{D_l}\right) \quad (\text{Ec. 11.6.29})$$

El factor de fricción (j_f) se determina con la figura 11.6.1 y el Reynolds de tubos (Ec. 11.6.16).

Para el caso de K301:

$$Re_t = \frac{0,02845 \cdot \frac{36744,31/3600}{\left(\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 0,02845^2\right) \cdot \left(\frac{448}{2}\right)}}{1,40E-5} = 145404$$

$$j_f = 0,0023$$

$$\Delta P = 8 \cdot 0,0023 \cdot \frac{2,641 \cdot 13,57^2}{2} \cdot \left(\frac{7,32}{0,02845}\right) = 11512 \text{ Pa}$$

11.6.3.- Intercambiadores de doble tubo

En los intercambiadores que al realizar el diseño por carcasa y tubos salían unas áreas de intercambio de calor muy pequeñas, no se cumplía la relación L/D_s , las velocidades estaban fuera de rango... se ha optado para el diseño de intercambiadores de doble tubo. Se han diseñado como doble tubo los intercambiadores H501, H601, H701 y H803.

1. Objetivo del intercambiador

El primer paso de diseño es caracterizar las corrientes. Hay que definir que fluido refrigerante o calefactor se va a usar, y a que temperatura va a operar. El fluido caliente se hace circular por el tubo interior y el frío por el exterior.

En la tabla 11.6.10 se presentan las propiedades de la corriente de colas de columna y el vapor que condensa. Las propiedades se han estimado con AspenHysys.

Tabla 11.6.10. – Propiedades de los fluidos

DATOS DE OPERACIÓN Y DISEÑO	TUBO ANULAR		TUBO INTERIOR	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
Fluido	Fluido de proceso		Vapor a baja P	Condensados
Fase	V	V	V	L
Caudal másico total (Kg/h)	2669,34	2669,34	74,23	74,23
Temperatura (°C)	19,08	65	152	150
Presión trabajo (Pa)	4,00E4	4,00E4	5,00E5	5,00E5
Densidad (Kg/m ³)	0,50	0,43	2,64	911,9
Viscosidad (Pa·s)	6,79E-6	8,01E-6	1,41E-5	1,75E-4
Calor específico (J/Kg·°C)	1265	1330	2552	4326
Conductividad (W/m·°C)	1,54E-2	1,83E-2	3,04E-2	0,686
Calor latente (J/kg)	2214	2214	2082	2082

2. Balance térmico

El calor que se desprende o absorbe en el tubo interior (d) es absorbido o desprendido por el tubo anular (D), cumpliendo el balance de energía.

$$q = m_d \cdot C p_d \cdot (T_1 - T_2) + m_d \cdot \lambda_d = m_D \cdot C p_D \cdot (T_1 - T_2) + m_D \cdot \lambda_D \quad (\text{Ec. 11.6.1})$$

El calor necesario para el proceso viene definido y se ha determinado usando AspenHysys o AspenPlus. Sabiendo las propiedades de operación del fluido calefactor o refrigerante se fija el caudal.

Para el caso de H501:

$$q_D = 43,07 \text{ KW determinada con Aspen}$$

$$q_d = m_d \cdot 0,741 \cdot (65 - 19,08) + m_a \cdot \lambda_a$$

Igualando q_t y q_s se determina el caudal vapor necesario:

$$m_d = 0,02 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 74,2 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

3. DTML contracorriente

Igual que en los otros intercambiadores la circulación de los fluidos se ara en contracorriente.

$$DTML = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (\text{Ec. 11. 6. 2})$$

Para el caso de H501:

$$DTML (^{\circ}\text{C}) = \frac{(152 - 19,08) - (150 - 65)}{\ln \frac{(152 - 19,08)}{(150 - 65)}} = 107,47 ^{\circ}\text{C}$$

4. Selección de las características de los tubos

Se fija el diámetro del tubo anular, del interno y el grosor de ambos tubos a partir de los datos estándar. Las dimensiones estándar de los tubos se consultan en la tabla 11.6.3 y 11.8.1.

$$d_I = 0,0254 \text{ m} \quad \Delta X_d = 0,00165 \text{ m} \quad d_E = 0,028714 \text{ m}$$

$$D_I = 0,198 \text{ m} \quad \Delta X_D = 0,00277 \text{ m} \quad d_E = 0,203 \text{ m}$$

5. Comprobación de la velocidad de circulación

Se calcula la velocidad de paso de fluido por tubos:

$$V_{tubo\ interior} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{m_d}{\rho \cdot A_{paso\ tubo}} = \frac{m_d}{\rho \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot d_I^2 \right)} \quad (\text{Ec. 11. 6. 37})$$

$$V_{tubo\ anular} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{m_D}{\rho \cdot A_{paso\ tubo\ anular}} = \frac{m_D}{\rho \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot (D_I - d_I)^2 \right)} \quad (\text{Ec. 11. 6. 38})$$

La velocidad obtenida se compara con valores de velocidades típicos de la bibliografía (R.K. Sinnott., 2005).

- Líquido por tubos: entre 1 y 2 m/s, máximo 4 m/s. Si el fluido es agua entre 1,5 y 2,5 m/s.
- Vapores: depende de la presión de operación y densidad del gas. En el rango siguiente, los valores más bajos corresponden a los vapores de peso molecular más alto.
 - Vacío: 50 – 80 m/s
 - Presión atmosférica: 10-30 m/s
 - Alta presión: 5 – 13 m/s

Para el caso de H501:

$$V_{tubo\ interior} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\frac{74,2}{3600}}{2,641 \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot 0,0254^2 \right)} = 15,4 \text{ m/s}$$

$$V_{tubo\ anular} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\frac{2669,34}{3600}}{0,495 \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot (0,198 - 0,0254)^2 \right)} = 64,02 \text{ m/s}$$

6. Determinación de la U del intercambiador a partir del cálculo de los coeficientes y factores de ensuciamiento

Para calcular la U primero hay que determinar los coeficientes individuales de transferencia de calor.

e. Coeficiente individual tubo interior sin cambio de fase

$$Nu_t = \frac{h_d \cdot d_i}{k} \quad (\text{Ec. 11. 6. 15})$$

Dónde:

$$n^\circ \text{ de Nusselt } Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (\text{Ec. 11. 6. 39})$$

$n = 0,3$ si circula el fluido caliente/ $n = 0,4$ si circula el fluido frío

$$n^\circ \text{ de Reynolds } Re_d = \frac{d_i \cdot G_t}{\mu} = \frac{d_i \cdot \frac{m_d}{A_{\text{paso tubo anular}}}}{\mu} \quad (\text{Ec. 11. 6. 16})$$

$$n^\circ \text{ de Prandtl } Pr_d = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (\text{Ec. 11. 6. 17})$$

a. Coeficiente individual tubo anular sin cambio de fase

$$Nu = \frac{h_D \cdot (D_i - d_i)}{k} \quad (\text{Ec. 11. 6. 15})$$

Dónde:

$$n^\circ \text{ de Nusselt } Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (\text{Ec. 11. 6. 39})$$

$n = 0,3$ si circula el fluido caliente/ $n = 0,4$ si circula el fluido frío

$$n^\circ \text{ de Reynolds } Re_D = \frac{(D_i - d_i) \cdot G_t}{\mu} = \frac{(D_i - d_i) \cdot \frac{m_d}{A_{\text{paso tubo anular}}}}{\mu} \quad (\text{Ec. 11. 6. 16})$$

$$n^\circ \text{ de Prandtl } Pr_D = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (\text{Ec. 11. 6. 17})$$

Para el caso de H501:

$$Re_D = \frac{(0,198 - 0,0254) \cdot \frac{2669,34/3600}{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (0,198 - 0,0254)^2}}{\mu} = 8,06E5$$

$$Pr_D = \frac{1330 \cdot 8,06E - 6}{1,83E - 2} = 0,58$$

$$Nu = 0,027 \cdot 8,06E5^{0,8} \cdot 0,58^{0,3} = 1216$$

$$h_D = \frac{1216 \cdot 1,54E - 2}{(0,198 - 0,0254)} = 131 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

a. Condensación en tubo interior

$$h_d = 0,76 \cdot k_L \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot 9,81}{\mu_L \cdot (m_{\text{condensado}}/L_{\text{supuesta}})} \right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 11. 6. 26})$$

Para el caso de H501:

$$h_d = 0,76 \cdot 0,686 \cdot \left(\frac{911,9 \cdot (911,9 - 2,641) \cdot 9,81}{1,75E - 4 \cdot (74,2/(3600 \cdot 41))} \right)^{1/3} = 23555 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Cálculo de la U global

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_d} + \frac{\Delta X_d}{k_{\text{acero}} \cdot \frac{D_{ml}}{d_I}} + \frac{d_I}{d_E} \cdot \frac{1}{h_D} \quad (\text{Ec. 11. 6. 39})$$

$$D_{ml} = \frac{d_E - d_i}{\ln \left(\frac{d_E}{d_I} \right)} \quad (\text{Ec. 11. 6. 40})$$

$$k_{\text{acero}} = 16,3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

Para el caso de H501:

$$D_{ml} = \frac{0,0287 - 0,0254}{\ln \left(\frac{0,0287}{0,0254} \right)} = 0,027 \text{ m}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{23555} + \frac{0,001657}{16,3 \cdot \frac{0,027}{0,0254}} + \frac{0,0254}{0,0287} \cdot \frac{1}{131}$$

$$U = 137 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

7. Cálculo de la área de intercambio y longitud del intercambiador

El área necesaria para el intercambio se calcula:

$$A (m^2) = \frac{q}{U \cdot DTML} \quad (\text{Ec. 11. 6. 4})$$

La longitud total del doble tubo viene dada por el área de contacto requerida:

$$L (m) = \frac{A}{\pi \cdot d_E} \quad (\text{Ec. 11. 6. 41})$$

Para el caso de H301:

$$A = \frac{4307}{137 \cdot 107,47} = 2,92 \text{ m}^2$$

$$L (m) = \frac{2,92}{\pi \cdot 0,0287} = 41 \text{ m}$$

8. Cálculo de las pérdidas de presión

Las pérdidas de presión se estiman como las de un tramo recto de tubería.

11.6.4 - Fired Heater

Para calentar el aire a la temperatura requerida a la entrada del reactor una vez realizada la compresión, se debe hacer pasar por un cambiador de calor adecuado a las bajas eficiencias caloríficas de este fluido. Por ello, se decide usar un cambiador de calor del tipo horno (fired heater o furnace). Para el dimensionamiento de este equipo se usa el software Aspen Hysys.

Primero se decide cuál de los tres tipos de cambiador se utiliza:

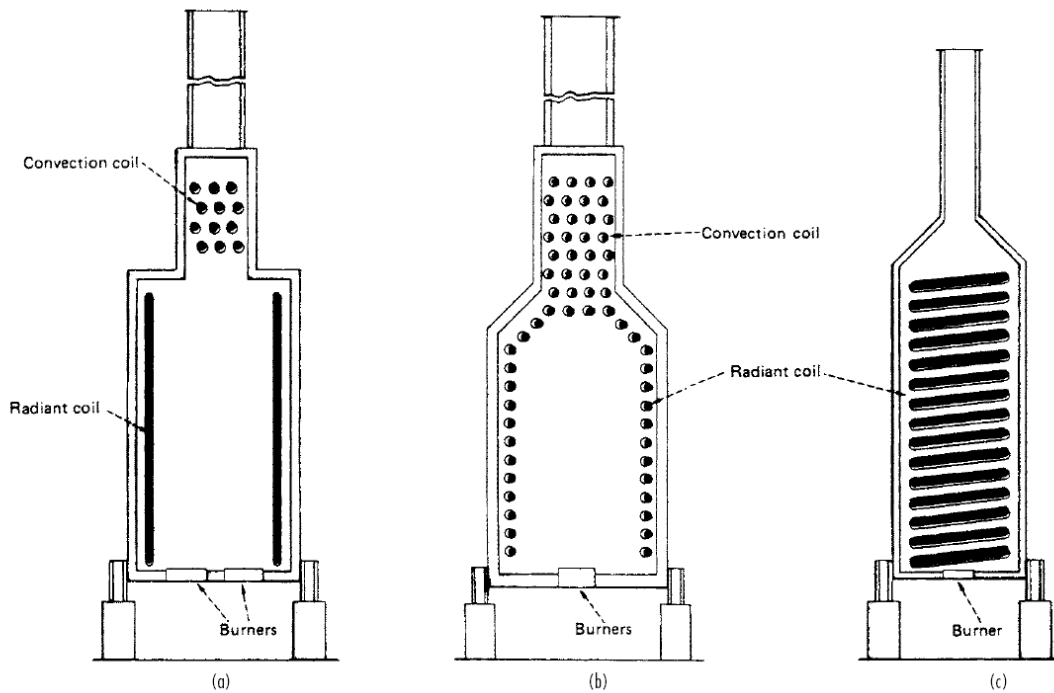


Figura 11.6.11.- A.- Cambiador vertical cilíndrico de doble tubo. B.- Cabina de tubos horizontales. C.- Cilíndrico vertical de tubo helicoidal.

Según los consejos del autor (Perry, 2002), se usa el tipo c, el cambiador de zona radial de serpentín helicoidal.

Para empezar el cálculo, conociendo el caudal de aire a tratar, que el fuel utilizado es gas natural y la temperatura objetivo, se estima el caudal necesario de gas que se introduce.

Caudal de gas =

$$m_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot \Delta T \cdot \text{Calor de combustion} \cdot PM_{gas\ natural} \quad (\text{Ec. 11. 6. 42})$$

Siendo:

$$m_{aire} = 63169,60 \text{ Kg/h}$$

$$C_{p_{aire}} = 29,238 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 250 - 25^\circ\text{C}$$

$$\text{Calor de combustion} = 870 \text{ kJ/kmol}$$

$$PM_{gas\ natural} = 16Kg/kmol$$

Así, el caudal de gas aproximado es de 271.52 Kg/h.

Para combustir este gas se necesita oxígeno, el cual se estima como un 5% superior al estequiométrico. Considerado la composición del aire del 21% en O₂, el caudal inicial de aire es de 2452,27 Kg/h.

Así pues, se introduce todos estos valores en Hysys, y se realiza las pertinentes tareas y se obtiene:

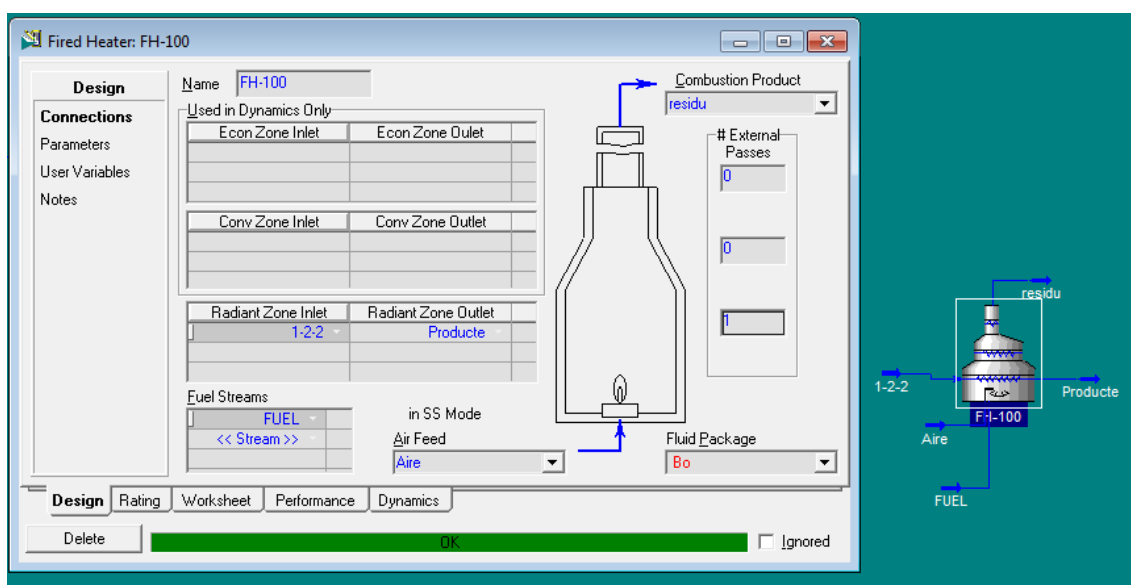


Figura 11.6.12.- Esquema de resolución del Fired Heater en Aspen Hysys.

Tabla 11.6.11.- Resultados de Aspen Hysys para los corrientes requeridos de combustible y aire, así como su producto y el efecto sobre el aire tratado.

	Aire Entrada	Aire Salida	Aire para combustión	Gas natural	Humos de combustión
Temperatura (°C)	25,000	250,000	25	25	370,5
Presión (bar)	2,000	2,000	1,013	1,471	1,013
Caudal molar (kmol/h)	2189,567	2189,567	250	50	317,502
Caudal másico (kg/h)	63169,600	63169,600	7212,567	802,1	8014,713
Caudal volumétrico (m3/h)	27111,416	47675,170	6113,39	826,071	16768,394
Densidad (kg/m3)	2,330	1,325	1,179	0,971	0,478

Y los resultados de medidas del horno:

Tabla 11.6.12.- Medidas del cambiador de calor tipo horno para calentar el aire introducido al reactor.

Diámetro interno (m)	1,75
Diámetro externo (m)	2
Altura (m)	5
Diámetro zona chimenea (m)	1
Altura chimenea (m)	3
Altura total (m)	8

11.7.- SISTEMA DE IMPULSIÓN DE SÓLIDOS NEUMÁTICO:

Para transportar la sal de sulfato amónico producida en el proceso, debido a su seguridad, higiene y bajo coste, se selecciona transportar dicha sal por medio de un sistema de impulsión neumático.

Existen dos tipos de impulsión neumática, por presión positiva o por vacío. El primero de ellos consiste en un gas a presión (generalmente aire o nitrógeno) que arrastra el sólido a transportar. Para este tipo de transporte se requieren sólidos de tamaño de partícula pequeños para poder realizarse la fluidización del sólido. El caso de la impulsión por vacío consiste en desplazar el sólido por succión, esto se consigue haciendo vacío al final del recorrido del sólido.

Debido al riesgo de explosión y a la elevada temperatura de salida de la sal del secador, se decide trabajar con un sistema de impulsión por presión positiva de nitrógeno ya que añade dos ventajas: Por un lado, dejar inerte la atmosfera explosiva que supone trabajar con una sal de partícula pequeña, y por otro, al inertizar con

nitrógeno criogénico, se enfría la sal y no se requiere de un intercambiador adicional para su almacenaje.

Así pues, se saben que se obtienen 6023,06 Kg/h de sulfato amónico como producto, y se siguen los siguientes consejos extraídos de la empresa ES Solidos Process Engineering:

- **Capacidad de transporte:** entre 1 a 50 T/h.
- **Velocidades de transporte:** generalmente entre 1 – 30m/s.
- **Distancias de transporte:** hasta 200 m.
- **Tipo de generador de gas:** soplante tipo Root, ventilador de presión.
- **Presión de trabajo:** hasta 1.000 mBar.
- **Relación Material/Aire:** Bajo a Medio, generalmente entre 3–15 Kg/Kg.

Figura 11.7. 1.- Relaciones de diseño para cuantificar los requerimientos de nitrógeno.

Según los consejos que se observan en la figura anterior, se decide fijar una relación Sólido/Nitrógeno de 7.5 y una velocidad de 15 m/s. Así se obtiene un consumo neto de nitrógeno de: **803,10Kg Nitrógeno/h.**

11.8.- CÁLCULO DE TUBERÍAS:

Para dimensionar correctamente las tuberías en una planta química se deben conocer todos los parámetros físicos e hidrodinámicos del fluido que va a circular. Como este proyecto no entra en detalles profundos en este tema, este punto se limita a seleccionar el diámetro de las diferentes tuberías del proceso según el fluido que circule.

11.8.1.- Selección del diámetro interno de la conducción:

Para fijar el diámetro se usarán las siguientes herramientas:

En primer lugar, se sabe que el diámetro interno de una conducción viene dado por la expresión:

$$\phi_{int} = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot v}} \quad (\text{Ec. 11.8.1})$$

11. Manual de cálculo

Por lo que solo falta fijar la velocidad de circulación del fluido. Bibliográficamente se compilan las siguientes figuras donde se aconsejan diferentes velocidades en función de la naturaleza de la conducción y el tamaño de ésta.

Velocidades típicas de agua en conducciones de acero.

Diámetro nominal	2" o menos	3" a 10"	10" a 20"
Clase de conducción	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)
Zona de succión	0,3 a 0,6	0,6 a 1,2	1 a 2
Zona de descarga	0,6 a 1	1 a 1,5	1,25 a 2,2
Alimento a caldera	1,25 a 2,7	1,5 a 3,7	2,5 a 4,3
Drenajes	1 a 1,25	1 a 1,5	-----
Vertidos inclinados	-----	1 a 1,5	1,25 a 2

Figura 11.8.1.- Velocidades habituales para la circulación de agua.

Velocidades típicas de hidrocarburos líquidos en conducciones de acero

Diámetro nominal	2" o menos	3" a 10"	10" a 20"
Clase de conducción	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)
Zona de succión	viscosidad media	0,5 a 1	0,75 a 1,5
	alquitrán y fueloil	0,12 a 0,24	0,15 a 0,8
Descarga corta	-----	1 a 1,5	1,25 a 1,8
Drenajes	0,3	0,45 a 1	-----

Velocidades típicas de gases y vapor de agua en conducciones.

Tamaño nominal	Baja presión	Presión media	Presión alta
	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)
2" o menos	14 a 30	12 a 24	9 a 18
3" a 4"	15 a 33	14 a 27	11 a 21
6"	18 a 37	15 a 37	14 a 27
8" a 10"	20 a 38	24 a 49	20 a 38
12" a 14"	21 a 40	30 a 58	24 a 44
16" a 18"	23 a 41	33 a 64	27 a 49
20"	24 a 43	37 a 67	30 a 52

Figura 11.8.2.- Velocidades habituales para la hidrocarburos y gases.

Y con la siguiente tabla, se ajusta el diámetro obtenido para seleccionar un diámetro de medidas comerciales.

Tabla 11.8.1.- Diámetros comerciales habituales para tuberías en pulgadas y equivalencia

DIN.

Pulgadas	DIN(mm)
1/4"	10
1/2"	15
3/4"	20
1"	25
1 1/4"	32
1 1/2"	40
2"	50
2 1/2"	65
3"	80
4"	100
5"	125
6"	150
8"	200
10"	250
12"	300
14"	350
16"	400
18"	450
20"	500
24"	600
26"	650
28"	700
30"	750
32"	800
34"	850
36"	900

38"	950
40"	1000

11.9.- EQUIPOS DE IMPULSIÓN DE FLUIDOS

11.9.1.- Bombas

Para calcular la potencia que requieren las bombas de la planta, así como saber dónde se requiere una, y no es suficiente la diferencia de altura o presión, etc. se realiza un balance de energía en las tuberías de la planta, siendo el trabajo por unidad de masa:

$$W_m = g \cdot (z_1 - z_2) + \left(\frac{P_2}{\phi_2} - \frac{P_1}{\phi_1} \right) + \frac{1}{2 \cdot \alpha} (v_2^2 - v_1^2) + \sum F \quad (\text{Ec. 11.9.1})$$

Dónde:

$$W_m = \text{trabajo másico} \left(\frac{J}{Kg} \right)$$

F, pérdidas por fricción (J/Kg)

$\alpha = 1$ para $Re > 2100$ (En todos nuestros casos)

1 y 2 indican inicio y fin del tramo estudiado.

Y se calcula:

$$\sum F = \sum_{\text{Tramo recto}} F + \sum_{\text{Accidentes}} F \quad (\text{Ec. 11.9.2})$$

Se asume que los accidentes son el 20% de las pérdidas de carga del tramo recto ya que no se puede estimarlas con precisión al no tener al detalle la implementación de tuberías.

Las pérdidas por tramo recto se estiman como:

$$\sum F_{\text{Tramo recto}} = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L}{\phi} \quad (\text{Ec. 11.9.3})$$

Dónde f , que es el factor de fricción se puede estimar con la ecuación de Coolebrook-White para flujos turbulentos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/\phi}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (\text{Ec. 11.9.4})$$

f , factor de fricción.

Con el método de Newton-Raphson del Software Microsoft Excel se resuelve la ecuación 11.9.4 para cada tubería y se obtiene con precisión el valor de f para cada una de ellas pudiendo así estimar el valor de $W(m)$. A partir de este valor se determina:

Carga total (h):

La carga total es la diferencia entre la carga de aspiración y la de impulsión, es decir, la que debe suministrar la bomba. Su ecuación es:

$$h = \frac{W(m)}{g} [m] \quad (\text{Ec. 11.9.5})$$

Dónde:

$$g = 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

Potencia total (P):

La energía que debe ceder la bomba en forma de potencia al líquido se calcula como:

$$Pot_{\text{Teórica}} = W(m) \cdot m [W] \quad (\text{Ec. 11.9.6})$$

Las bombas, al tratarse de máquinas reales no transforman la totalidad de la energía recibida en trabajo al fluido, sino que disipan una parte de esa energía. Así pues, para obtener la energía para buscar en catálogos y dimensionar el consumo eléctrico de la planta, se usa el valor de rendimiento del 70% para este tipo de equipo recomendado por el software Aspen Hysys.

La potencia será:

$$Pot = \frac{P_{Teórica}}{\eta} \quad (\text{Ec. 11. 9. 7})$$

11.9.2.- Soplantes

El balance de energía para este equipo se calcula como:

$$P_1^2 - P_2^2 = G^2 \frac{RT}{PM} \cdot \left(\frac{4fL}{\phi_H} + 2 \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right) \quad (\text{Ec. 11. 9. 8})$$

ϕ_H , diámetro hidráulico (m).

Como se comentó en el punto 4, este balance es poco relevante ya que solo sirve para determinar el consumo aproximado del equipo. Para seleccionar este tipo de equipos se requiere de las condiciones de operación y capacidad reales.

11.9.3.- Compresores

El procedimiento de cálculo y selección es análogo al de los soplantes, sin embargo, el cálculo de la potencia es ligeramente distinto:

$$W_p = \left[\frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \right] \cdot \left[\frac{z \cdot R \cdot T}{M} \right] \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{(\gamma-1)}} - 1 \right] \quad (\text{Ec. 11. 9. 9})$$

Dónde:

$$\gamma = \text{Eficacia de compresión} \left(\frac{C_p}{C_v} \right)$$

$$z = \text{Factor de compresividad}$$

$$R = 8314,34 \frac{J}{\text{kmol} \cdot K}$$

11.10.- GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD (TURBINA G-1001)

El vapor generado de media presión en los reactores se hace pasar por una turbina de vapor para generar electricidad y vapor de menor presión y temperatura.

La turbina de vapor es una máquina de fluido en la que la energía de éste pasa al eje de la máquina saliendo el fluido con menor cantidad de energía. La energía mecánica del eje procede en parte de la energía mecánica que tenía la corriente y por otra de la energía térmica disponible transformada en mecánica por expansión. Esta expansión es posible por la variación del volumen específico del fluido que evoluciona en la máquina.

El vapor que sale del reactor es de 40 bar y 260°C y el vapor que se quiere obtener de la turbina es de 5 bar y 152°C. Sabiendo esto se puede calcular el trabajo disponible en la turbina que es la diferencia de entalpia entre el vapor de entrada y salida.

$$W = H_1 - H_2 \quad (\text{Ec. 11. 10. 1})$$

H_1 : Entalpia del vapor de entrada $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

H_2 : Entalpia de vapor de salida $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

$$W = 2997,76 - 2748,7$$

Se calcula la potencia eléctrica que genera la turbina aplicando un rendimiento del 80% que es un valor típico para este tipo de turbinas.

$$Pot = W \times m_{tubos} \times \eta \quad (\text{Ec. 11. 10. 2})$$

η : Rendimiento de la turbina.

m_{tubos} : Caudal del vapor generado en los 2 reactores (kg/s).

La potencia y energía eléctrica generada con el vapor que entra y el que se quiere conseguir es 2378,701 kW y 17126651,405 kW.h respectivamente.

Con estos datos se elige la turbina de vapor SST-150 de Siemens.

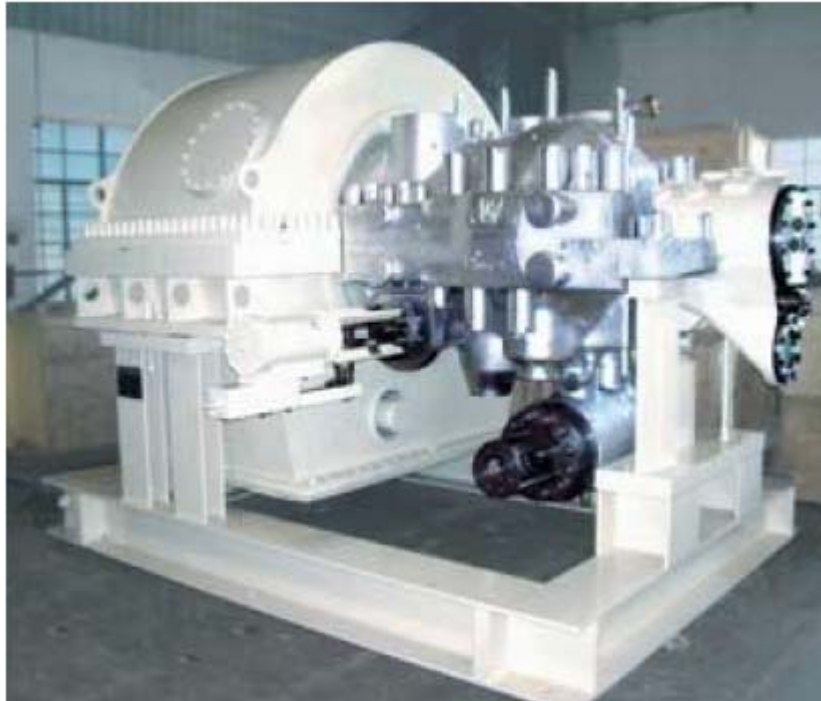


Figura 11.10.1.- Turbina de vapor SST-150 de Siemens.

Tabla 11.10.1.- Datos de la turbina de vapor

Velocidad de giro máxima (rpm)	13300
Longitud (m)	12
Ancho (m)	4
Altura (m)	5
Área de escape (m ²)	0,28-1,6

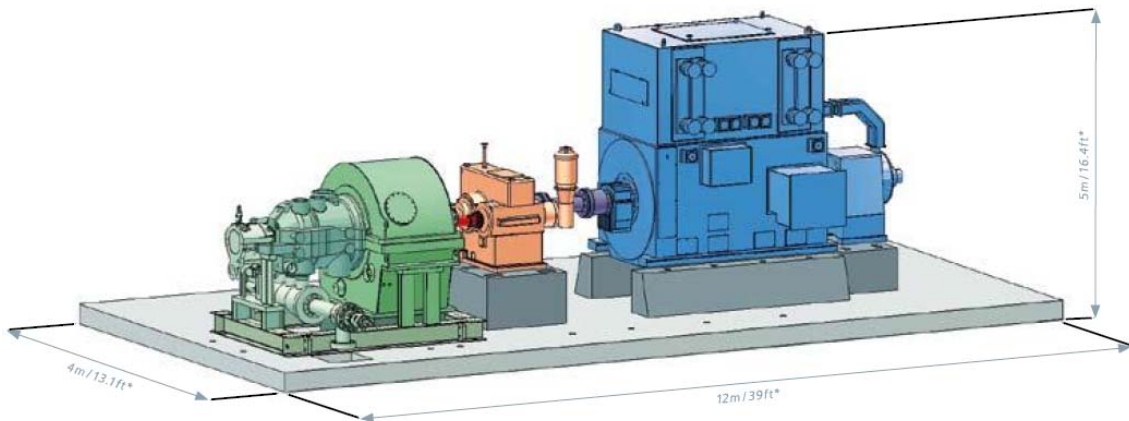


Figura 11.10.2.- Dimensiones de la turbina de vapor SST-150 de Siemens.

11.11.- TORRES DE REFRIGERACIÓN

En las torres de refrigeración se produce la disminución de la temperatura del agua cuando se pone en contacto el agua caliente que procede del proceso con una masa de aire no saturada. El enfriamiento se produce por la transferencia de calor sensible, debido a la diferencia de temperaturas de ambos fluidos y por la transferencia de calor latente, es decir, la evaporación del agua.

El agua caliente entra por la parte superior de la torre, circulando por gravedad a la parte baja de la torre, cruzándose a contracorriente con el aire impulsado por un ventilador. Así pues, el agua llega a la base de la torre, donde su temperatura habrá disminuido por el efecto ya citado de evaporación, limitando su efectividad a las condiciones ambientales de temperatura y humedad.

Para estimar el número de torres necesarias hay que conocer los equipos que utilizan agua de la torre de refrigeración y la cantidad.

Tabla 11.11.1. – Equipos que necesitan agua de refrigeración.

Intercambiador	Caudal (Kg/h)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura salida (°C)
C301	149995,1	30	40
C601	789543,35	30	40
C602	261599,75	30	40
C701	226661,84	30	40
H302	149995,1	30	40
H801	400985,91	30	40
TOTAL	1978781,05	30	40

Se selecciona una torre que se adapte a las necesidades de esta planta. La torre elegida es del fabricante EWK torres de refrigeración modelo EWB 5750.

Tabla 11.11.2.- Características torre de refrigeración EWB 5750.

Calor disipado (KW)	9193
Peso equipo vacío (kg)	11500
Peso en operación (kg)	16300
Potencia ventilador (KW)	2x30.0
Largo (m)	6,75
Ancho (m)	6,1
Alto (m)	4,322

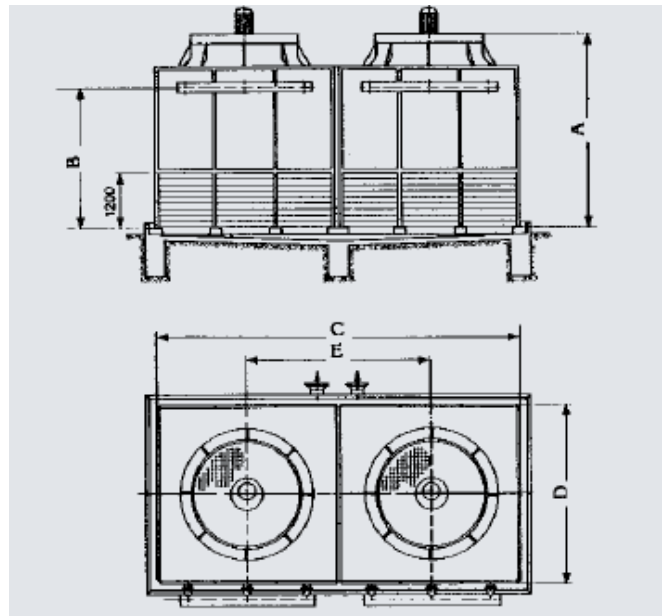


Figura 11.11.1. - Torre de refrigeración EWB 5750.

Se calcula la cantidad de agua que puede ser tratada en cada torre seleccionada.

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (\text{Ec. 11.11.1})$$

$$\text{Caudal a tratar por cada torre} = 219,225 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 789211,618 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Se divide el caudal de agua de refrigeración que se necesita en esta planta entre el caudal de agua que se puede tratar en cada torre y se obtiene el número de torres que hacen falta.

$$N^{\circ} \text{ de torres} = \frac{\text{agua de torre necesaria} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{agua que se trata en una torre} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)} \quad (\text{Ec. 11.11.2})$$

$$N^{\circ} \text{ torres necesarias} = 2,507 \approx 3 \text{ torres}$$

En esta planta son necesarias 3 torres de refrigeración colocadas en batería para tratar todo el agua de refrigeración necesaria. Cada torre trata:

Tabla 11.11.3.- Cantidad que trata cada torre de refrigeración:

Q disipada por cada torre (kW)	7683,16709
m tratada por cada torre (kg/h)	659593,683

Hay que tener en cuenta que una torre de refrigeración tiene pérdidas de agua, principalmente por la evaporación, por la purga (para que no se produzca una concentración de sales en la torre) y por las gotas que salen por la parte superior donde se encuentra el ventilador. Por lo tanto, para mantener constante el caudal de agua, es necesario calcular el agua que hay que añadir a la torre.

La cantidad de agua evaporada se calcula:

$$m_{evaporada} = \frac{Q}{\lambda_{vaporizacion}} \quad (\text{Ec. 11.11.3})$$

$$m_{evaporada} = 12435,663 \frac{kg}{h}$$

El agua que se pierde por el ventilador de la torre es un 0,01% del caudal total del agua tratada en la torre.

$$m_{gotas} = 0,01\% \times m_{tratada \text{ en la torre}} \quad (\text{Ec. 11.11.4})$$

$$m_{gotas} = 0,018 \frac{kg}{h}$$

El agua que se pierde durante la purga de las sales para evitar acumulación de estas, se calcula en función del agua perdida en forma de gotas, del agua evaporada y del número de concentración, que se escoge de 3.

$$m_{purga} = \frac{m_{gotas} \times C - m_{evaporada} - m_{gotas}}{1 - C} \quad (\text{Ec. 11.11.5})$$

C : Número de concentración.

$$m_{purga} = 6217,813 \frac{kg}{h}$$

El caudal de agua que hay que añadir a cada torre:

$$m_{\text{agua añadida}} = m_{\text{evaporada}} + m_{\text{gotas}} + m_{\text{purga}} \quad (\text{Ec. 11. 11. 6})$$

$$m_{\text{agua añadida a cada torre}} = 18653,494 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

11.12.- CHILLER

Para alcanzar temperaturas más bajas que las obtenidas por las torres de refrigeración, se necesitan unos equipos de frío. Por un equipo de frío circula un fluido refrigerante, y consta de un condensador, un evaporador, una válvula de expansión y un compresor. Se utilizan una serie de chiller para agua de refrigeración y otro grupo para agua glicolada al 30% que alcanza menores temperaturas.

11.12.1.- Agua de refrigeración

El objetivo de estos chillers es rebajar la temperatura del agua de 24,6 °C a 5 °C.

Los equipos que necesitan de este servicio se muestran a continuación:

Tabla 11.12.1. – Equipos que utilizan agua de refrigeración del chiller.

Intercambiador	Caudal (Kg/h)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura salida (°C)
C502	133452	5	25
H301	288792	5	25
H502	27252	5	20
H601	5185,75	5	25
H701	1613,5	5	25
H803	13991,14	5	20
TOTAL	470286,39	5	24,56

Para conocer los chillers necesarios, se calcula la potencia frigorífica.

$$Pot_{\text{frigorífica}} = m_{\text{agua}} \times C_p \times \Delta T \quad (\text{Ec. 11. 12. 1})$$

$$Pot_{frigorífica} = 10783,488 \text{ Kw}$$

El chiller elegido es el de la empresa Carrier, modelo 19XR - PIC II, que es una enfriadora de agua de condensación por agua con compresor centrífugo. Tiene un intervalo de potencia frigorífica de 1000 a 5300 KW. El refrigerante utilizado es el R134a.



Figura 11.12.1.- Chiller 19XR - PIC II de la empresa Carrier.

Se calculan los chiller que hacen falta en esta planta.

$$N^a_{de\ chiller} = \frac{Pot_{frigorífica}}{Pot_{frig\ del\ chiller\ seleccionado}} = 2,035 \approx 3 \text{ (Ec. 11. 12. 2)}$$

Se necesitan 3 chiller para el agua de refrigeración en esta planta.

Ahora se calcula con que porcentaje trabaja cada chiller. Con la potencia del equipo y con la que corresponde a cada uno.

$$\left(1 - \frac{5300 - 3594,496}{5300}\right) \times 100 = 67,821\%$$

11.12.2.- Agua glicolada

Estos chillers se utilizan para bajar la temperatura de -5°C a -13°C. Los equipos que utilizan este servicio se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 11.12.2. – Equipos que utilizan agua glicolada.

Intercambiador	Caudal (Kg/h)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura salida (°C)
C302	412607,46	-13	-3
C501	14810,17	-13	-3
H802	551239,05	-13	-3
TOTAL	978656,68	-13	-3

Para conocer los chillers necesarios, se calcula la potencia frigorífica.

$$Pot_{frigorífica} = m_{agua} \times C_p \times \Delta T \text{ (Ec. 11. 12. 1)}$$

$$Pot_{frigorífica} = 12234,164 \text{ Kw}$$

El chiller elegido, es el mismo que para el agua refrigeración, de la empresa Carrier modelo 19XR - PIC II, que es una enfriadora de agua de condensación por agua con compresor centrífugo. Tiene un intervalo de potencia frigorífica de 1000 a 5300 KW. El refrigerante utilizado es el R134a.

La potencia frigorífica del chiller está calculada para el agua pura, por lo que hay que corregirla ya que en este caso se utiliza agua glicolada al 30%. Se utiliza el factor de corrección de la potencia frigorífica para el agua glicolada al 30%.

Tabla 11.12.3 .- Corrección para agua glicolada al 30%:

Agua glicolada 30%	
factor corrección Potencia frigorífica (KW)	0,965
Tª congelación (°C)	-17

Por lo que la potencia real del chiller.

$$Pot_{chiller} = 0,965 \times 5300 = 5114,500 \text{ Kw}$$

A continuación se calcula el número de chiller necesarios.

$$N^a_{de\ chiller} = \frac{Pot_{frigorífica}}{Pot_{frig\ del\ chiller\ seleccionado}} = 1,9 \approx 2 \quad (Ec. 11. 12. 2)$$

En esta planta, se utilizan 2 chiller para el agua glicolada.

Ahora se calcula con que porcentaje trabaja cada chiller. Con la potencia del equipo y con la que corresponde a cada uno.

$$\left(1 - \frac{5300 - 4989,297}{5300}\right) \times 100 = 96,500\%$$

11.13.- CALDERA VAPOR

11.13.1.- Operación

A continuación se calcula la caldera necesaria para suministrar el vapor de baja presión (152°C y 5 bar) consumido en la planta. Para ello en primer lugar se realiza un balance de materia, presentado en la tabla 11.13.1 Se puede observar que durante la operación la planta consume un total de 110658,57 Kg/h. A este vapor hay que restarle el vapor residual de la turbina de vapor 42891,4 Kg/h y el vapor generado al enfriar la salida del reactor en el intercambiador H105 que es de 6611,58 kg/h. Así que la caldera tendrá que evaporar 61155,59 Kg/h de condensados.

Tabla 11.13.1. – Balance de materia de vapor

Equipo	Caudal (Kg/h)	Equipo	Caudal (Kg/h)
K301	36744,31	H105	6611,58
K302	3456,05	Turbina vapor	42891,40
K501	36744,31	TOTAL	49502,98
K502	4276,22		
K601	1669,17		
K602	5484,12		
K701	5769,95		
H101	2106,100		
H103	3039,000		
H501	2669,34		
Cristalizador	7700		
Secador horizontal	1000		
TOTAL	110658,57		

La potencia térmica de caldera necesaria se calcula como,

$$Q = m_{condensados} \cdot Cp \cdot (T_s - T_e) + m_{condensados} \cdot \lambda \quad (\text{Ec. 11.13.1})$$

$$Q = 61155,59 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \left(0,175 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (152 - 150) ^\circ\text{C} + 2082 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$= 127347330,6 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} = 35374,26 \text{ KW}$$

El grupo de calderas para la operación tendrá que suministrar 61,16 Tn/h de vapor a 152°C y 5 bar, lo que supone una potencia de 35,37 MW.

La planta dispondrá de 3 calderas del fabricante VIESSMAN modelo VITOMAX 200 HS M235. Una con capacidad de 18 Tn/h y dos de 22 Tn/h. De modo que la capacidad total de vapor será de 62 Tn/h que es superior a la que se necesita. De modo que hay que estimar a que porcentaje trabajaran.

$$\left(1 - \frac{62 - 61,16}{62} \right) \cdot 100 = 98,64\%$$

Para el cálculo de la economía es necesario hacer una estimación del consumo de gas natural de la planta. Para calcularlo primero se determina la potencia térmica que adsorbe el fluido con la ecuación 11.13.1. Fija un rendimiento del 87%, típico para calderas pirotubulares, se calcula la potencia nominal de la caldera que tendrá que ser suministrada por el gas natural. Con el PCI de éste se determina su consumo.

$$\text{Consumo gas natural (m}^3/\text{h)} = \frac{\text{Pot.}}{\eta \cdot \text{PCI}} \quad (\text{Ec. 11. 13. 2})$$

$$\text{PCI}_{\text{gas natural}} = \text{poder calorífico inferior del gas natural} = 40000 \text{ KJ/m}^3$$

$$\text{Consumo gas natural} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{35374,26 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}}{0,87 \cdot 40000 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}} = 1,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

11.1.2.- Puesta en marcha

Durante la puesta en marcha las calderas tendrán que ser capaces de suministrar todo el vapor consumido en planta, que tal y como se ha estimado en el apartado anterior es de 110658,57 Kg/h. A este vapor hay que restarle el vapor que pueden generar las calderas de operación cuándo trabajan a pleno rendimiento.

La planta dispondrá de 3 calderas de operación que pueden suministrar un caudal de vapor de 62000 kg/h, así que las caldera de puesta en marcha tendrán que suministrar como mínimo 48658,57 kg/h. Para ello se escogen 2 calderas de 25 Tn/h, de modo que la planta tendrá una capacidad total de producción de vapor de 112 Tn/h. Para la puesta en marcha las calderas trabajaran al siguiente porcentaje.

$$\left(1 - \frac{112 - 110,66}{112} \right) \cdot 100 = 98,80\%$$

11.14.- DISCOS DE RUPTURA

Un disco de ruptura es un dispositivo de alivio instantáneo de sobrepresiones o depresiones.

Plantas, tanques, reactores, silos, o cualquier otro equipo que trabaje con presión, puede dañarse o destruirse por variaciones no controladas de dicha presión. Para proteger los equipos, y sobre todo a las personas, es necesario emplear equipos de seguridad que permitan eliminar el exceso de presión, proporcionando al fluido un punto de escape o salida.

Del mismo modo, es posible proteger los equipos de los riesgos causados por una depresión o vacío. Los dispositivos de seguridad más utilizados son los discos de ruptura y las válvulas de seguridad que, con características constructivas y de funcionamiento diferentes, logran obtener el mismo objetivo.

Los discos llamados comúnmente de ruptura, rotura, alivio o venteo son membranas fabricadas en diversos materiales, diseñados para romperse y permitir la evacuación o paso del fluido a una presión/depresión predeterminada.



Figura 11.14.1.-Disco de ruptura real.

Los discos de ruptura ofrecen las siguientes ventajas frente a otros sistemas de alivio de presión:

- Bajo coste y prácticamente sin mantenimiento.
- Respuesta instantánea y sin fallos.
- Fugacidad prácticamente nula.
- Apertura completa.

- Alta fiabilidad.
- Pueden ser utilizados como sistemas únicos de alivio o bien, asociados a una válvula de seguridad.

Así pues, para su dimensionamiento se aplicará el criterio del fabricante Fike de seleccionar el diámetro del disco de ruptura en función de la presión a soportar. Para determinar la presión del disco de ruptura se sobrestima dicha presión entre un 50 y un 100% de margen, así fijamos el 75 % para este caso siendo:

$$P_{Disco} = 1,75 \cdot P_{Op.} \quad (\text{Ec. 11.14.1})$$

Queda resumido pues la necesidad en la siguiente tabla:

Tabla 11.10.1.- Valores de presión de operación y del disco de ruptura de los equipos que lo requieren.

Equipo	Presión Op. (Bar)	Presión disco (Bar)
T-101 /T-102	12,58	22,00
T-103 / T-104/ T-105/T-106	14,32	25,10
T-107 / T-108/ T-109/T-110/T-111	1	1,75
T-112	1	1,75
T-503	1	1,75
T-603	1	1,75
T-901/T-902/T-903/T-904/T-905	1	1,75
T-906	5	8,65
T-907	1	1,75
T-908/T-909/T-910	1	1,75
T-911	1	1,75
T-912	1	1,75
R-201/R-202	2	3,50
CA-301	1	1,75
CF-301	1	1,75

11. Manual de cálculo

CA-302	1	1,75
CD-501	5	8,75
CD-502	1	1,75
DTB-401	1	1,75

Así pues, se selecciona discos de grafito para evitar problemas de interacción con los fluidos.

GD SERIES BURST PRESSURES & DIMENSIONS

Fits Class 150 ANSI Flanges										
Nozzle Size	Diameter		Thickness		Burst Pressures PSIG/BARG				Gasket I.D.	Gasket O.D.
	I.D.	O.D.	GD, GDV	GDHT	Min. PSIG	Min. BARG	Max. PSIG	Max. BARG		
1	1	2-1/2	7/8	2-1/4	15	.69	400	27.58	1-5/16	2-1/2
1-1/2	1-1/2	3-1/4	7/8	2-1/4	7	.48	300	20.68	1-29/32	3-1/4
2	2	4	7/8	2-1/4	3	.21	250	17.24	2-1/2	4
3	3	5-1/4	7/8	2-1/4	2	.14	200	13.79	3-3/4	5-1/4
4	4	6-3/4	7/8	2-1/4	2	.10	150	10.34	5	6-3/4
6	6	8-5/8	7/8	2-1/4	1	.07	100	6.89	7-1/8	8-5/8
8	8	10-7/8	1-1/8	2-3/4	1	.07	100	6.89	8-7/8	10-7/8
10	10	13-1/4	1-1/2	3-3/8	1	.07	100	6.89	11-5/8	13-1/4
12	12	16	2	4-3/8	1/2	.03	100	6.89	13-3/4	16
14	13-1/4	17-5/8	2-1/4	4-7/8	1/2	.03	75	5.17	14-1/2	17-5/8
16	15-1/4	20-1/8	2-1/2	5-3/8	1/2	.03	75	5.17	17	20-1/8
18	17-1/4	21-1/2	2-3/4	5-7/8	1/2	.03	50	3.45	19-1/2	21-1/2
20	19-1/4	23-3/4	3	6-3/8	1/2	.03	30	2.07	21-3/4	23-3/4
24	23-1/4	28-1/8	3	6-3/8	1/2	.03	25	1.72	25	28-1/8

Figura 11.10.2.- Especificaciones de los discos de ruptura proporcionados por Ficke.

Según la figura anterior proporcionada por el fabricante: se puede decir que todos los discos de ruptura de la planta se instalan de 10" con excepción de los equipos de T-101 a T-106, T-906 y CD-501 que llevan instalado un disco de 1".