

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE RESINAS EPOXI LÍQUIDAS

PROYECTO DE FINAL DE CARRERA

INGENIERÍA QUÍMICA



Alejandro Polo Matas

Francisco Habas Palma

Sandra Lloria Hernández

Safae El Hmidi Cherkaoui

Samantha González Restrepo

Junio 2022

Tutor: Rafa Bosch

UAB
Universitat
Autònoma
de Barcelona

e escola
d'enginyeria

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE RESINAS EPOXI LÍQUIDAS

CAPÍTULO 11. MANUAL DE CÁLCULOS



Alejandro Polo Matas

Francisco Habas Palma

Sandra Lloria Hernández

Safae El Hmidi Cherkaoui

Samantha González Restrepo

Junio 2022

Tutor: Rafa Bosch

UAB
Universitat
Autònoma
de Barcelona

e escola
d'enginyeria

ÍNDICE

11. MANUAL DE CÁLCULO	3
11.1. Cálculos previos	4
11.2 Tanques de almacenamiento	6
11.2.1 Tanque de almacenamiento de Bisfenol-A	6
11.2.2 Tanque de almacenamiento de Epiclorhidrina	13
11.2.3 Tanque de almacenamiento de NaOH	20
11.2.4 Tanque de almacenamiento de LER	26
11.2.5 Tanque de almacenamiento de BTAC	32
11.2.6 Tanque de almacenamiento de MIBK	38
11.3. Mezcladores	43
11.3.1 Mezclador T-200	44
11.3.2. Mezclador T-109	55
11.3.3 Mezclador T-500	63
11.3.4 Mezclador T-301	71
11.3.5. Mezclador T-300	79
11.4. Reactores	87
11.4.1. Diseño de los reactores R-200 Y R-201	88
11.4.2. Diseño de reactores R-300 Y R-301	103
11.4.3. Diseño del reactor R-500 y R-501	115
11.5. Diseño de refrigeración de Reactores	128
11.5.1. Diseño del sistema calefactor de R-200	131
11.5.2. Sistema refrigeración R-300/301	134
11.5.3. Sistema de refrigeración R-500/501	138
11.6. Diseño de intercambiadores	141
11.6.1. Calculo para el diseño de intercambiadores	141
11.6.2. Diseño IC-200	144
11.6.3. Diseño IC-201	160

11.6.4. Diseño IC-300.....	165
11.6.5. Diseño IC-301.....	170
11.6.6. IC-500.....	175
11.6.7. Diseño IC-602-1	180
11.6.8. Diseño IC-602-2	185
11.7. Decantadores.....	190
11.7.1. Decantador 300	190
11.7.2. Decantador 301	194
11.9. Diseño de la torre de destilación DC-602.....	202
11.9.1. Cálculo del fluido refrigerador para el condensador	211
11.9.2. Cálculo del fluido calefactor para el reboiler	212
11.10. Diseño de bombas	213
11.11. Diseño de compresores	217
11.12. Diseño de los equipos de servicio	218
11.12.1. Caldera de vapor CV-700.....	218
11.12.2. Caldera de aceite CT-700.....	219
11.12.3. Torre de refrigeración TR-700.....	220

11. MANUAL DE CÁLCULO

El presente capítulo 11 se trata de la recopilación de metodologías de cálculo para el diseño e instalación de los diferentes equipos y factores que se usan en la línea de proceso de producción de la resina epoxi líquida en la planta de ResyTech S.L.

Esta colección se centra en mostrar al lector paso a paso y de forma ordenada los cálculos realizados para el diseño de los equipos utilizados. Se seguirá la línea de cálculo de forma detallada con tal de que la persona interesada no se pierda entre los cálculos y facilite su seguimiento y comprensión.

Previamente al diseño de dichos equipos, se debe conocer el proceso a diseñar y los cálculos pertinentes como puede ser: la estequiometría de la reacción, producción objetivo, balance de materia e identificación de los equipos necesarios. Justo a continuación, se puede proceder los balances térmicos y equipos que participan en el proceso.

La finalidad de la planta presentada en este trabajo consiste en el estudio y diseño de un proceso producción de 12.000 tn anuales de resina epoxi líquida a partir de los reactivos bisfenol-A y epíclorhidrina. El sistema propuesto es de un proceso batch, también conocido como proceso por lotes, donde se introduce la cantidad total de materia prima al comienzo del proceso y se obtiene la cantidad total de producto transcurrido el tiempo de proceso. La característica especial de la línea de proceso de ResyTech S.L. es que debido al tipo de distribución de los equipos, se simula un proceso en continuo compuesto por varios en batch. Esto se debe a que todos los reactores utilizados en la empresa, excepto la primera etapa de reacción en los reactores R-200/201 los cuales operan en continuo, el resto trabaja en discontinuo. Por ello, se diseñan dos reactores discontinuos exactamente iguales entre sí en cada etapa de reacción con tal de que mientras uno este en operación, el otro este en período de descarga y de carga, de tal manera que tal y como el primero finalice el tiempo de residencia, el otro justo comience con la operación, de manera que este se vaya descargando y cargando, obteniendo así un sistema “*pseudo-continuo*”, donde de forma global se consume la materia prima y se obtiene un corriente de producto de forma continua, compuesto por varios procesos batchs entrelazados.

11.1. Cálculos previos

En el siguiente capítulo, en ocasiones se referenciarán las sustancias que toman parte en el proceso como abreviaciones de estas mismas, ya que esto facilitará la comprensión del texto y el seguimiento de este. Seguido, se mostrarán los compuestos y sus abreviaciones utilizadas:

Tabla 11.1. Nomenclatura de los compuestos

COMPONENTE DE REACCIÓN	NOMENCLATURA
BISFENOL-A	B-A
EPICLORHIDRINA	EP
CATALIZADOR DE AMONIO CUATERNARIO	BTAC
RESINA EPOXÍDICA LÍQUIDA	LER
FENOL POLIHÍDRICO	B-PH
DICLORURO DE GLICEROL	GD
AGUA	H ₂ O
HIDRÓXIDO DE SODIO	NaOH
CLORURO DE SODIO	NaCl
METIL ISOBUTIL CETONA	MIBK

El primer paso es el cálculo del balance de materia del proceso. Para ellos nos basaremos en la producción anual requerida y a partir de aquí, mediante la estequiometría, encontrar la cantidad de materia prima necesaria para el proceso.

La reacción global de la conversión de bisfenol-a y epiclorhidrina para conseguir resina epoxi líquida es de:



Ecuación 11.1. Reacción global



Ecuación 11.2. Reacciones por etapa del proceso

Como se puede apreciar en la ecuación 11.1, se encuentra la relación estequiométrica entre los reactivos y el producto. Dicha reacción se basa en la interacción de la epiclorhidrina con el bisfenol-A, donde estos al unirse se crea el intermedio BPH, el cual posteriormente se le añade sosa caustica con tal de eliminar los cloruros de la molécula y reduciendo la cantidad de cloruros hidrolizables. Obteniendo así la resina epoxi líquida final.

Gracias a esto, y el valor de LER a producir, podremos encontrar el valor de la materia prima mínima necesaria para cumplir dicho objetivo.

$$12.000 \frac{tn}{año} LER * \frac{1000 kg}{1 tn} * \frac{1 año}{300 días} * \frac{1 día}{24 h} = 1666,66 \frac{kg}{h} LER$$

Ecuación 11.3. Producción de LER necesaria por hora

Se puede ver que se ha relacionado el año con 300 días. Esto se debe a que los días operativos de producción anuales consta de 300 días debido a que en la planta se harán dos parones al año por motivos de mantenimiento.

Una vez se obtiene dicha producción necesaria, se puede encontrar los corrientes necesarios de cada reactivo:

$$1666,66 \frac{kg}{h} LER * \frac{1 kmol LER}{340,4 kg LER} * \frac{1 kmol B - A}{1 kmol LER} = 4,896 \frac{kmol}{h} B - A$$

Ecuación 11.4. Moles necesarios de Bisfenol-A

$$1666,66 \frac{kg}{h} LER * \frac{1 kmol LER}{340,4 kg LER} * \frac{1 kmol EPI}{1 kmol LER} = 4,896 \frac{kmol}{h} EPI$$

Ecuación 11.5. Moles necesarios de Epiclorhidrina

Como se ha comentado anteriormente, estos valores hacen referencia a la cantidad mínima necesaria de cada reactivo, esto se debe a que este valor simboliza una conversión de reacción del 100 %, cosa que no se da en el proceso. Al igual que una suposición de la eficiencia de los equipos total, 100% de eficiencia, cosa que tampoco es posible en casi ninguno de los equipos.

Por ello, se comenzó diseñando en *Excel* el balance de materia a partir de estos valores, donde a medida que se introducían las conversiones de cada etapa y se iban diseñando los equipos, así como sus eficiencias, se determinó que dicho corriente de materia prima era insuficiente para conseguir el valor de LER deseado. Mediante la relación utilizada de epiclorhidrina en función de la entrada de bisfenol-a que se describe en la patente utilizada, siendo esta de una ratio molar de 9,85 a 1 respectivamente. Mediante iteraciones del proceso donde se conocían las características de eficacia de operación de cada equipo, se iteró el valor de bisfenol-A de entrada necesario, obteniéndose a su vez el valor de epiclorhidrina, hasta obtener un valor de producción de LER algo superior al necesario con tal de poder disponer de un margen de error en la producción.

Los valores finales obtenidos son de 1.187,04 kg/h de B-A, 4.738,60 kg/h de EPI y finalmente una producción de LER de 17186,68 kg/h.

Una vez conocido esto, y hecho el balance de materia total, se comienza a diseñar el tamaño y especificaciones de los equipos.

11.2 Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son los primeros equipos a través de los cuales se lleva a cabo la producción de líquido epoxi resina. Estos tanques son los encargados de contener en su interior las materias primas a través de las cuales, siguiendo una serie de procesos, se obtiene el producto de interés. Además de las materias primas, también se utilizan tanques para almacenar los subproductos generados durante el proceso.

El material utilizado para el diseño de los tanques de almacenamiento es el acero inoxidable. Se ha escogido este material ya que es el que más se ajusta a los requerimientos de la planta debido a sus características, de entre las cuales destacan principalmente su elevada resistencia a la corrosión y su durabilidad.

11.2.1 Tanque de almacenamiento de Bisfenol-A

Para saber el volumen del tanque de almacenamiento del Bisfenol-A necesario para poder cubrir las necesidades semanales, partimos del consumo de este reactivo, que es de 1.187,04 Kg por cada hora.

$$Q_{Bisfenol-A} = \frac{1.187,04 \text{ kg}}{h} * \frac{m^3}{1.195 \text{ kg}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} * \frac{7 \text{ días}}{\text{semana}} = 143,04 \text{ m}^3/\text{semana}$$

Una vez calculado el volumen total necesario de Bisfenol-A, procedemos a calcular el volumen total del tanque de almacenamiento, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos de reactivo, especialmente en el caso del bisfenol A, debido a su alto grado de corrosividad e irritabilidad.

$$V_{Tanque} = 1,2 * V_{Bisfenol-A} = 1,2 * 143,04 m^3 = 171,65 m^3$$

Una vez obtenido el valor del volumen del tanque, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del tanque de almacenamiento es de $171,65 \text{ m}^3$.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 171,65 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 5,262 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 5,262 \text{ m} = 7,893 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el tanque de almacenaje del Bisfenol-A, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de este reactivo.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el tanque, que es la temperatura a la que se encontraría el Bisfenol-A más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^\circ\text{C} = 20 + 15 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del tanque. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el Bisfenol-A y el incremento de presión causado por la altura del tanque. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,912 \text{ atm}) = 2,2 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.195 \text{ kg/m}^3 * 7,893 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 92434,9 \text{ kg/ms}^2 = 92434,9 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 92434,9 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,912 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este tanque está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se de ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.1, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{4,736 \text{ m}}{0,403 \text{ m}} = 11,752$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 5,262 \text{ m} = 4,736 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 4,736 \text{ m} = 0,403 \text{ m}$

Tabla 11.2. Relación entre factor M y coeficiente L/r.

M	1	1,03	1,06	1,08	1,1	1,13	1,15	1,17	1,18	1,2	1,22
L/r	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
M	1,25	1,28	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,46	1,48	1,5
L/r	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
M	1,52	1,54	1,56	1,58	1,6	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,77
L/r	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15	16	16,66

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.2 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del tanque (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{Sd * E} + CA$$

Ecuación 11.6. Espesor de diseño

Dónde:

- τd es el espesor de diseño (mm)
- D es el diámetro interior del tanque (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- G es la gravedad específica de diseño del líquido almacenado
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- Sd es la tensión admisible en condiciones de diseño (MPa)

Substituyendo los valores en la ecuación 11.6 obtenemos:

$$\tau d = \frac{4,9 * 5,262m * (7,893m - 0,3) * \frac{1195 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2mm = 3,89mm$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del tanque es de 3,89 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

- $\tau_{\text{Op lateral}} = \tau_d + \tau_{\text{virola}} = 3,89 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 8,89 \text{ mm}$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

- $\tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{\text{Op lateral}} = 1,5 * 8,89 \text{ mm} = 13,335 \text{ mm}$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del tanque (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * D * (H - 0,3)}{St * E} + CA$$

Ecuación 11. 7. Espesor de carcasa

Dónde:

- τ_t es el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica (mm)
- D es el diámetro interior del tanque (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- St es la tensión admisible para la prueba hidráulica (MPa)

Substituyendo los valores en la ecuación 11.7 obtenemos:

$$\tau_t = \frac{4,9 * 5,262\text{m} * (7,893\text{m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2\text{mm} = 4,09 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del tanque de almacenamiento. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del tanque ($\tau_{\text{Op cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{Op cabezal}} = \frac{P * R}{2 * S * E - 0,2 * P} + C1 + C2$$

Ecuación 11.8. Espesor de operación del cabezal

Donde:

- P es la presión de diseño (psi)
- R es el radio (pulgadas)
- S es la tensión admisible (psi)
- E es el factor de soldadura
- C1 es el sobre espesor de corrosión (mm) = 3 mm
- C2 es la tolerancia de fabricación (mm) = 2 mm

Substituyendo los valores en la ecuación 11.8 obtenemos:

$$\tau_{op_{cabezal}} = \frac{32,34 \text{ psi} * 103,58 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 32,34 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5.025 \text{ mm}$$

- $P = 2,2 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 32,34 \text{ psi}$
- $r = \frac{D}{2} = \frac{5,262 \text{ m}}{2} = 2,631 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 103,58 \text{ pulgadas}$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{op_{cabezal}} = 1,5 * 5,025 \text{ mm} = 7,538 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del tanque y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 13,335 mm
- Espesor cabezal = 7,538 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 13,335 mm para todo el tanque de almacenamiento.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del tanque:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 5,262 \text{ m} + 2 * 0,013335 \text{ m} = 5,289 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la figura 11.1.

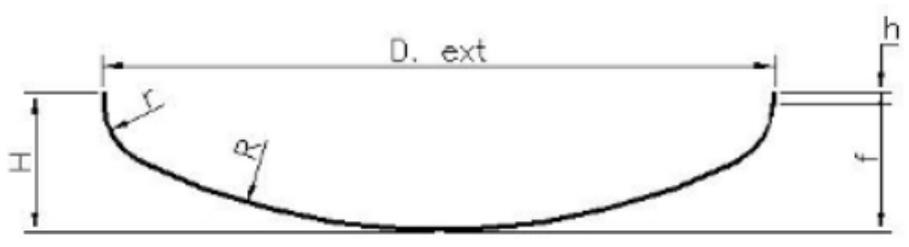
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="5289"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="13.335"/>	
 <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="5949"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="5289"/>	
r (mm)	<input type="text" value="528.9"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="46.6725"/>	
f (mm)	<input type="text" value="1017"/>	
H (mm)	<input type="text" value="1077"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="14572.5"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="2965"/>	

Figura 11.1. Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En la figura 11.1, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En ella, se deduce un volumen de 14572,5 litros, o equivalentemente 14,572 m³ del fondo del tanque.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del tanque:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{tanque}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 171,65 \text{ m}^3 + 2 \cdot 14,572 \text{ m}^3 = 200,8 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{cili} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho$$
$$= \frac{\pi}{4} * 7,893m * ((5,289m)^2 - (5,262m)^2) * \frac{8000kg}{m^3} = 14128 kg$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del tanque:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * (5,289m^3 - 5,262m^3) * 8000kg/m^3$$
$$= 1803,45 kg$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del tanque entero:

$$M_{tanque} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 14128 kg + 2 * 1803,45kg = 17734,9kg$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * (5,262 m)^2 = 21,75 m^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (7,262m)^2 = 52,74 m^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot Dc = 5,262m + 2 \cdot 1m = 7,262m$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 52,74m^2 - 21,75m^2 = 31m^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{tanque}}{\text{Área libre}} = \frac{171,65m^3}{31m^2} = 5,537 m$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Amplitud}^2 * \text{Altura} = (7,262m)^2 * 5,537m = 292 m^3$$

11.2.2 Tanque de almacenamiento de Epiclorhidrina

Para saber el volumen del tanque de almacenamiento de epiclorhidrina necesario para poder cubrir las necesidades semanales, partimos del consumo de este reactivo, que es de 4.738,60 Kg por cada hora.

$$Q_{Epiclorhidrina} = \frac{4.738,60 \text{ kg}}{h} * \frac{m^3}{1.180 \text{ kg}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} * \frac{7 \text{ días}}{\text{semana}} = 578,27 \text{ m}^3/\text{semana}$$

Debido al elevado caudal de epiclorhidrina requerido para llevar a cabo el proceso de producción de líquido epoxi resina, es necesario utilizar 4 tanques de almacenamiento de este reactivo. Por lo tanto, a continuación, se calcula el volumen necesario de cada uno de los tanques en los cuales se almacena epiclorhidrina.

$$Q_{Epiclorhidrina \text{ 1 tanque}} = \frac{578,27 \frac{m^3}{\text{semana}}}{4 \text{ tanques}} = 144,56 \frac{m^3}{\text{semana}}$$

Una vez calculado el volumen total necesario de epiclorhidrina para cada uno de los 4 tanques de almacenamiento, procedemos a calcular el volumen total del tanque de almacenamiento, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos de reactivo ya que, en el caso específico de la epiclorhidrina, se trata de un líquido con un alto grado de corrosividad, irritabilidad, inflamabilidad y toxicidad.

$$V_{Tanque} = 1,2 * V_{Epiclorhidrina} = 1,2 * 144,56 m^3 = 173,47 m^3$$

Una vez obtenido el valor del volumen del tanque, que no será el volumen total, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del tanque de almacenamiento es de 173,47 m³.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 173,47 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 5,28 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 5,28m = 7,92 m$$

Igual que se ha sobredimensionado el tanque de almacenaje de la epiclorhidrina por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de este reactivo.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el tanque, que es la temperatura a la que se encontraría la epiclorhidrina más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{OPERACIÓN} + 15^{\circ}C = 20 + 15 = 35 \text{ }^{\circ}C$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del tanque. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra la epiclorhidrina y el incremento de presión causado por la altura del tanque. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{OPERACIÓN} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,904 \text{ atm}) = 2,19 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.180 \text{ kg/m}^3 * 7,92m * 9,8 \text{ m/s}^2 = 91586,88 \text{ kg/ms}^2 = 91586,88 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 91586,88 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,904 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este tanque está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se de ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: E=0,8.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.2, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{4,752 \text{ m}}{0,404 \text{ m}} = 11,76$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 5,28 \text{ m} = 4,752 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 4,752 \text{ m} = 0,404 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.2 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del tanque (τ_d):

$$\tau_d = \frac{4,9 * 5,28 \text{ m} * (7,92 \text{ m} - 0,3) * \frac{1180 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 3,87 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del tanque es de 3,87 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\tau_{\text{oplateral}} = \tau_d + \tau_{\text{virola}} = 3,87 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 8,87 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\cdot \tau_{lateral} = 1,5 * \tau_{oplateral} = 1,5 * 8,87 \text{ mm} = 13,31 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del tanque (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * 5,28m * (7,92m - 0,3)}{117 * 0,8} + 2mm = 4,106 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Kloppe, debido al fondo toriesferico del tanque de almacenamiento. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del tanque ($\tau_{op_{cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op_{cabezal}} = \frac{32,193 \text{ psi} * 103,93 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 32,193 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5.025 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 2,19 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 27,988 \text{ psi}$$

$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{5,28 \text{ m}}{2} = 2,64m * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{m} = 103,93 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{op_{cabezal}} = 1,5 * 5,025 \text{ mm} = 7,537 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del tanque y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 13,31 mm
- Espesor cabezal = 7,537 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 13,31 mm para todo el tanque de almacenamiento.

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 5,28 + 2 * 0,01331m = 5,306m$$

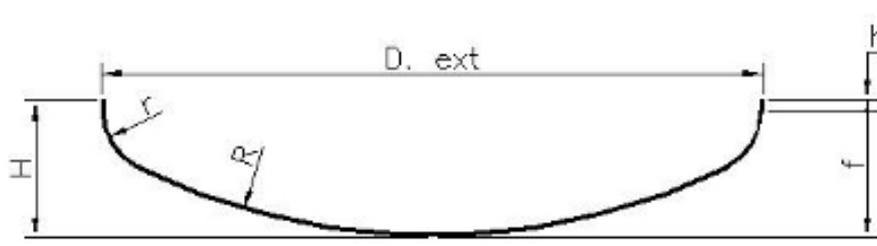
Calculadora de fondos KLOPPER	
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="5306"/>
Espesor (mm)	<input type="text" value="13.31"/>
 <p style="text-align: center;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>	
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="5967"/>
R (mm)	<input type="text" value="5306"/>
r (mm)	<input type="text" value="530.6"/>
h (mm) >=	<input type="text" value="46.585"/>
f (mm)	<input type="text" value="1021"/>
H (mm)	<input type="text" value="1081"/>
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="14714.6"/>
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="2978"/>
<input type="button" value="Calcular"/>	

Figura 11.2 Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppler.

En la figura 11.2, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppler.

En ella, se deduce un volumen de 14714,6 litros, o equivalentemente 14,71 m³ del fondo del tanque.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del tanque:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{tanque}} + V_{\text{superior}} + V_{\text{inferior}} = 173,47 \text{ m}^3 + 2 \cdot 14,71 \text{ m}^3 = 202,89 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{cili} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho = \frac{\pi}{4} * 7,92m * ((5,306m)^2 - (5,28m)^2) * \frac{8000kg}{m^3}$$
$$= 13696,5 \text{ kg}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del tanque:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * ((5,306m)^3 - (5,262m)^3) * 8000kg/m^3$$
$$= 2948,44 \text{ kg}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del tanque entero:

$$M_{tanque} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 13696,5 \text{ kg} + 2 * 2948,44kg = 19593,4kg$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque. Al haber 4 tanques iguales, primeramente, hay que calcular la distancia entre los tanques:

$$Distància \text{ entre tanqs} = \frac{D_{ext}}{2} = \frac{5,306}{2} = 2,653 \text{ m}$$

Por normativa, la distancia entre la distancia entre la pared del tanque y la cubeta (Dpc) ha de ser de 1 metro.

$$\text{Àrea ocupada} = \frac{\pi}{4} * N * D^2 = \frac{\pi}{4} * 4 * (5,28 \text{ m})^2 = 87,58 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud de la cubeta} = N * D_{ext} + (N - 1) * D \text{ entre tanques} + 2 * D_{pc}$$
$$= 4 * 5,306 + (4 - 1) * 2,653 + 2 * 1 = 31,183 \text{ m}$$

$$\text{Anchura de la cubeta} = D_{ext} + 2 * D_{pc} = 5,306 + 2 * 1 = 7,306 \text{ m}$$

$$\text{Àrea cubeta} = \text{Longitud de la cubeta} * \text{Anchura de la cubeta} = 31,183 * 7,306$$
$$= 227,82$$

$$\text{Àrea libre} = \text{Àrea cubeta} - \text{Àrea ocupada} = 227,82 - 87,58 = 140,24 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{tanque}}{\text{Àrea libre}} = \frac{173,47m^3}{140,24m^2} = 1,237 \text{ m}$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Longitud} * \text{Amplitud} * \text{Altura} = 31,183 * 7,306 * 1,237$$
$$= 281,81 \text{ m}^3$$

11.2.3 Tanque de almacenamiento de NaOH

Para saber el volumen del tanque de almacenamiento del hidróxido de sodio necesario para poder cubrir las necesidades semanales, partimos del consumo de este reactivo, que es de 449,3 Kg por cada hora.

$$Q_{NaOH} = \frac{449,3 \text{ kg}}{h} * \frac{m^3}{2130 \text{ kg}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} * \frac{6 \text{ días}}{\text{semana}} = 30,37 \text{ m}^3/\text{semana}$$

Una vez calculado el volumen total necesario de hidróxido de sodio procedemos a calcular el volumen total del tanque de almacenamiento, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos de reactivo.

$$V_{Tanque} = 1,2 * V_{NaOH} = 1,2 * 30,37 \text{ m}^3 = 36,45 \text{ m}^3$$

Una vez obtenido el valor del volumen del tanque, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del tanque de almacenamiento es de 36,45 m³.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 36,45 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 3,14 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 3,14 \text{ m} = 4,71 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el tanque de almacenaje, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de este reactivo.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el tanque, que es la temperatura a la que se encontraría el hidróxido sódico más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 20 + 15 = 35^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del tanque. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el hidróxido sódico y el incremento de presión causado por la altura del tanque. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,97 \text{ atm}) = 2,26 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 2130 \text{ kg/m}^3 * 4,71\text{m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 98316,54 \text{ kg/ms}^2 = 98316,54 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 98316,54 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,97 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este tanque está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klopper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.2, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{2,826 \text{ m}}{0,24 \text{ m}} = 11,764$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 3,14 \text{ m} = 2,826 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 2,826 \text{ m} = 0,24 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.2 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una $M= 1,61$. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del tanque (τ_d):

$$\tau_d = \frac{4,9 * 3,14 \text{ m} * (4,71 \text{ m} - 0,3) * \frac{2130 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 3,16 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del tanque es de 3,16 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\tau_{\text{oplateral}} = \tau_d + \tau_{\text{virola}} = 3,16 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 8,16 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\tau_{lateral} = 1,5 * \tau_{oplateral} = 1,5 * 8,16 \text{ mm} = 12,24 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del tanque (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * 3,14m * (4,71m - 0,3)}{117 * 0,8} + 2mm = 2,725 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del tanque de almacenamiento. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del tanque ($\tau_{p_{cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{p_{cabezal}} = \frac{33,22 \text{ psi} * 61,81 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 33,22 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5.015 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \cdot P &= 2,26 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 33,22 \text{ psi} \\ \cdot r &= \frac{D}{2} = \frac{3,14 \text{ m}}{2} = 1,57 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 61,81 \text{ pulgadas} \end{aligned}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{p_{cabezal}} = 1,5 * 5,015 \text{ mm} = 7,523 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del tanque y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 12,24 mm
- Espesor cabezal = 7,523 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 12,24 mm para todo el tanque de almacenamiento.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del tanque:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 3,14 \text{ m} + 2 * 0,01224 \text{ m} = 3,164 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la figura 11.3.

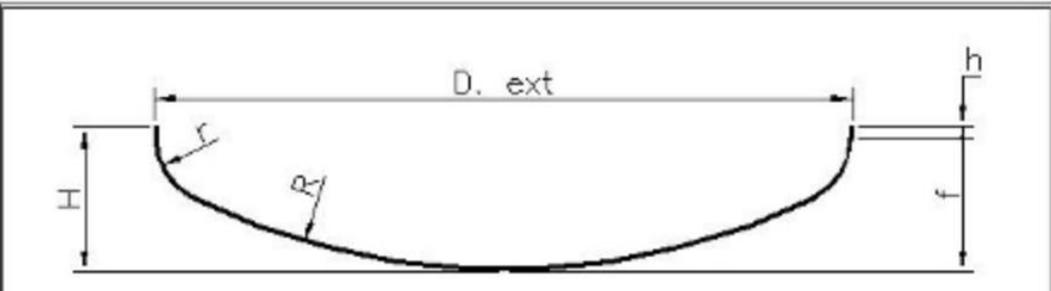
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="3164"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="12.24"/>	
 <p style="text-align: center;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="3588"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="3164"/>	
r (mm)	<input type="text" value="316.40000"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="42.84"/>	
f (mm)	<input type="text" value="607"/>	
H (mm)	<input type="text" value="662"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="3094.5"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="990"/>	

Figura 11.3. Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En la figura 11.3, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En ella, se deduce un volumen de 3094,5 litros, o equivalentemente 3,09 m³ del fondo del tanque.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del tanque:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{tanque}} + V_{\text{superior}} + V_{\text{inferior}} = 36,45 \text{ m}^3 + 2 \cdot 3,09 \text{ m}^3 = 42,63 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{\text{cili}} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \cdot \rho = \frac{\pi}{4} * 4,71 \text{ m} * ((3,164 \text{ m})^2 - (3,14 \text{ m})^2) * \frac{8000 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$
$$= 4477,42 \text{ kg}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del tanque:

$$M_{\text{cabezal}} = 0,1 * (D_{\text{ext}}^3 - D_{\text{int}}^3) * \rho = 0,1 * ((3,164 \text{ m})^3 - (3,14 \text{ m})^3) * 2130 \text{ kg/m}^3$$
$$= 572,26 \text{ kg}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del tanque entero:

$$M_{\text{tanque}} = M_{\text{cili}} + 2 * M_{\text{cabezal}} = 4477,42 \text{ kg} + 2 * 572,26 \text{ kg} = 5621,94 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * (3,14 \text{ m})^2 = 7,74 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (5,14 \text{ m})^2 = 26,42 \text{ m}^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot D_c = 3,14 \text{ m} + 2 \cdot 1 \text{ m} = 5,14 \text{ m}$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 26,42 \text{ m}^2 - 7,74 \text{ m}^2 = 18,68 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{\text{tanque}}}{\text{Área libre}} = \frac{36,46 \text{ m}^3}{18,68 \text{ m}^2} = 1,95 \text{ m}$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Amplitud}^2 * \text{Altura} = (5,14 \text{ m})^2 * 1,95 \text{ m} = 51,51 \text{ m}^3$$

11.2.4 Tanque de almacenamiento de LER

Las cargas de producto destinadas a la exportación se realizan cada vez que se han obtenido 23 toneladas de resina epoxi líquida, que teniendo en cuenta el ritmo de producción, equivalen a 13,25 horas.

En la empresa Resytech S.L, se ha decidido implantar un sistema de 5 tanques que permitan almacenar la producción durante, por lo menos, 2 días. De esta manera, si se produce algún fallo de logística en el proceso de carga de producto es posible continuar con la producción ya que se dispone de otros 4 tanques auxiliares.

Primeramente, es necesario calcular el volumen al que equivalen 23 toneladas de LER:

$$V_{LER} = 23.000 \text{ kg} * \frac{1 \text{ m}^3}{1160 \text{ kg}} = 19,82 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, procedemos a calcular el volumen total de cada uno de los tanques de almacenamiento, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos de reactivo.

$$V_{Tanque} = 1,2 * V_{LER} = 1,2 * 19,82 \text{ m}^3 = 23,78 \text{ m}^3$$

Una vez obtenido el valor del volumen del tanque, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del tanque de almacenamiento es de 23,78 m³.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 23,78 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 2,72 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 2,72 \text{ m} = 4,08 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el tanque de almacenaje de líquido epoxi resina, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de este reactivo.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el tanque, que es la temperatura a la que se encontraría la resina epoxi líquida más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 20 + 15 = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del tanque. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra la resina epoxi líquida y el incremento de presión causado por la altura del tanque. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,4577 \text{ atm}) = 1,676 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.160 \text{ kg/m}^3 * 4,08 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 46381,44 \text{ kg/ms}^2 = 46381,44 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 46381,44 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,4577 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este tanque está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: E=0,8.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.2, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{2,448 \text{ m}}{0,208 \text{ m}} = 11,77$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 2,72 \text{ m} = 2,448 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 2,448 \text{ m} = 0,208 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.2 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del tanque (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * 2,72 \text{ m} * (4,08 \text{ m} - 0,3) * \frac{1160 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,47 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del tanque es de 2,47 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = \tau_d + \tau_{\text{virola}} = 2,47 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,47 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{\text{oplateral}} = 1,5 * 7,47 \text{ mm} = 11,206 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del tanque (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * 2,72 \text{ m} * (4,08 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,538 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del tanque de almacenamiento. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del tanque ($\tau_{\text{op}_{\text{cabezal}}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{op}_{\text{cabezal}}} = \frac{24,637 \text{ psi} * 53,54 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 24,637 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5,01 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 1,676 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 24,637 \text{ psi}$$
$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{2,72 \text{ m}}{2} = 1,36 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 53,54 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{\text{cabezal}} = 1,5 * \tau_{\text{op}_{\text{cabezal}}} = 1,5 * 5,01 \text{ mm} = 7,515 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del tanque y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 11,206 mm
- Espesor cabezal = 7,515 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 11,206 mm para todo el tanque de almacenamiento.

$$D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} + 2 * \tau_{\text{lateral}} = 2,72 + 2 * 0,011206 \text{ m} = 2,742 \text{ m}$$

Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="2742"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="11.206"/>	
		
fondo Toriesferico Tipo KLOPPER		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="3113"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="2742"/>	
r (mm)	<input type="text" value="274.2"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="39.221"/>	
f (mm)	<input type="text" value="525"/>	
H (mm)	<input type="text" value="575"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="2011.5"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="682"/>	

Figura 11.4 :Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En la figura 11.4, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En ella, se deduce un volumen de 2011,5 litros, o equivalentemente 2,01 m³ del fondo del tanque.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del tanque:

$$V \text{ tanque final} = V_{\text{tanque}} + V_{\text{superior}} + V_{\text{inferior}} = 23,78 \text{ m}^3 + 2 \cdot 2,01 \text{ m}^3 = 27,8 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{cili} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) * \rho = \frac{\pi}{4} * 4,08m * ((2,742m)^2 - (2,72m)^2) * \frac{8000kg}{m^3}$$
$$= 3080,45 kg$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del tanque:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * ((2,742m)^3 - (2,72m)^3) * 8000kg/m^3$$
$$= 393,8 kg$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del tanque entero:

$$M_{tanque} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 3080,45 kg + 2 * 393,8 kg = 3868,05kg$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque. Al haber 5 tanques iguales, primeramente, hay que calcular la distancia entre los tanques:

$$Distància entre tanqs = \frac{D_{ext}}{2} = \frac{2,724}{2} = 1,362 m$$

Por normativa, la distancia entre la distancia entre la pared del tanque y la cubeta (Dpc) ha de ser de 1 metro.

$$\text{Àrea ocupada} = \frac{\pi}{4} * N * D^2 = \frac{\pi}{4} * 5 * (2,72 m)^2 = 29,05 m^2$$

$$\text{Longitud de la cubeta} = N * D_{ext} + (N - 1) * D_{entre tanques} + 2 * D_{pc}$$
$$= 5 * 2,724 + (5 - 1) * 1,362 + 2 * 1 = 21,07 m$$

$$\text{Anchura de la cubeta} = D_{ext} + 2 * D_{pc} = 2,742 + 2 * 1 = 4,742 m$$

$$\text{Àrea cubeta} = \text{Longitud de la cubeta} * \text{Anchura de la cubeta} = 21,07 * 4,742$$
$$= 99,91 m^2$$

$$\text{Àrea libre} = \text{Àrea cubeta} - \text{Àrea ocupada} = 99,91 - 29,05 = 70,86 m^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{tanque}}{\text{Àrea libre}} = \frac{23,78m^3}{70,86m^2} = 0,335 m$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Longitud} * \text{Amplitud} * \text{Altura} = 21,07 * 4,742 * 0,335$$
$$= 33,47 m^3$$

11.2.5 Tanque de almacenamiento de BTAC

Para saber el volumen del tanque de almacenamiento del BTAC necesario para poder cubrir las necesidades semanales, partimos del consumo de este catalizador, que es de 12,55 Kg por cada hora.

$$Q_{BTAC} = \frac{12,55 \text{ kg}}{h} * \frac{m^3}{1.070 \text{ kg}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} * \frac{7 \text{ días}}{\text{semana}} = 1,69 \text{ m}^3/\text{semana}$$

Una vez calculado el volumen total necesario de BTAC, procedemos a calcular el volumen total del tanque de almacenamiento, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos del catalizador.

$$V_{Tanque} = 1,2 * V_{BTAC} = 1,2 * 1,69 \text{ m}^3 = 2,03 \text{ m}^3$$

Una vez obtenido el valor del volumen del tanque, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del tanque de almacenamiento es de 2,03 m³.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 2,03 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 1,2 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 1,2 \text{ m} = 1,8 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el tanque de almacenaje del BTAC, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de este catalizador.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el tanque, que es la temperatura a la que se encontraría el BTAC más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 20 + 15 = 35^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del tanque. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el BTAC y el incremento de presión causado por la altura del tanque. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,186 \text{ atm}) = 1,364 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.070 \text{ kg/m}^3 * 1,8\text{m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 18.874,8 \text{ kg/ms}^2 = 18.874,8 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 18.874,8 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,186 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este tanque está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se de ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.2, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{1,08 \text{ m}}{0,092 \text{ m}} = 11,739$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 1,2 \text{ m} = 1,08 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 1,08 \text{ m} = 0,092 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.2 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una $M= 1,61$. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del tanque (τ_d):

$$\tau_d = \frac{4,9 * 1,2 \text{ m} * (1,8 \text{ m} - 0,3) * \frac{1070 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,076 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del tanque es de 2,076 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = \tau_d + \tau_{\text{virola}} = 2,076 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,076 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{\text{lateral}} = 1,5 * 7,076 \text{ mm} = 10,614 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del tanque (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * 1,2 \text{ m} * (1,8 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2\text{mm} = 2,09 \text{ mm}$$

El modelo a seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del tanque de almacenamiento. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del tanque ($\tau_{op_{cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op_{cabezal}} = \frac{20,05 \text{ psi} * 23,62 \text{ pulgadas}}{2 * 84122\text{psi} * 0,8 - 0,2 * 20,05\text{psi}} + 3 + 2 = 5.004 \text{ mm}$$

- $P = 1,364 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 20,05 \text{ psi}$
- $r = \frac{D}{2} = \frac{1,2 \text{ m}}{2} = 0,6 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 23,62 \text{ pulgadas}$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{op_{cabezal}} = 1,5 * 5,004 \text{ mm} = 7,505 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del tanque y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,614 mm
- Espesor cabezal = 7,505 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,614 mm para todo el tanque de almacenamiento.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del tanque:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 1,2\text{m} + 2 * 0,010614\text{m} = 1,22 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la figura 11.4.

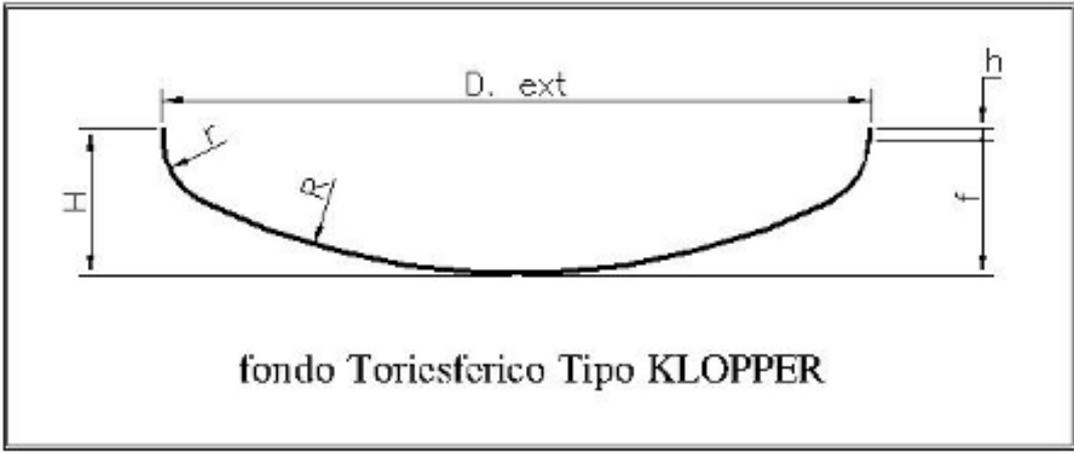
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	1220	
Espesor (mm)	10.614	
 <p style="text-align: center;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	1424	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	1220	
r (mm)	122	
h (mm) >=	37.149	
f (mm)	231	
H (mm)	279	
V (sin h) (litros)	172.3	
Peso (h minima) (kg)	135	

Figura 11.5: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En la figura 11.5, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En ella, se deduce un volumen de 172,3 litros, o equivalentemente $0,1723 \text{ m}^3$ del fondo del tanque.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del tanque:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{tanque}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 2,03 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,1723 \text{ m}^3 = 2,375 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{\text{cili}} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot 1,8 \text{ m} \cdot ((1,22 \text{ m})^2 - (1,2 \text{ m})^2) \cdot \frac{8000 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$
$$= 547,39 \text{ kg}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del tanque:

$$M_{\text{cabezal}} = 0,1 \cdot (D_{\text{ext}}^3 - D_{\text{int}}^3) \cdot \rho = 0,1 \cdot (1,22 \text{ m}^3 - 1,2 \text{ m}^3) \cdot 8000 \text{ kg/m}^3$$
$$= 70,28 \text{ kg}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del tanque entero:

$$M_{\text{tanque}} = M_{\text{cili}} + 2 \cdot M_{\text{cabezal}} = 547,39 \text{ kg} + 2 \cdot 70,28 \text{ kg} = 687,95 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (1,2 \text{ m})^2 = 1,131 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (3,2 \text{ m})^2 = 10,24 \text{ m}^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot D_c = 1,2 \text{ m} + 2 \cdot 1 \text{ m} = 3,2 \text{ m}$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 10,24 \text{ m}^2 - 1,131 \text{ m}^2 = 9,109 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{\text{tanque}}}{\text{Área libre}} = \frac{2,03 \text{ m}^3}{9,109 \text{ m}^2} = 0,223 \text{ m}$$

$$V_{\text{volumen cubeta}} = \text{Amplitud}^2 \cdot \text{Altura} = (3,2 \text{ m})^2 \cdot 0,223 \text{ m} = 2,284 \text{ m}^3$$

11.2.6 Tanque de almacenamiento de MIBK

Para saber el volumen del tanque de almacenamiento del MIBK necesario para poder cubrir las necesidades semanales, partimos del consumo de este disolvente, que es de 427,6 Kg por cada hora.

$$Q_{MIBK} = \frac{427,6 \text{ kg}}{h} * \frac{m^3}{802 \text{ kg}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} * \frac{7 \text{ días}}{\text{semana}} = 76,78 \text{ m}^3/\text{semana}$$

Una vez calculado el volumen total necesario de MIBK, procedemos a calcular el volumen total del tanque de almacenamiento, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos del catalizador.

$$V_{Tanque} = 1,2 * V_{MIBK} = 1,2 * 76,78 \text{ m}^3 = 92,13 \text{ m}^3$$

Una vez obtenido el valor del volumen del tanque, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del tanque de almacenamiento es de 92,13 m³.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 92,13 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 4,276 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 4,276 \text{ m} = 6,415 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el tanque de almacenaje del MIBK, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de este disolvente.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el tanque, que es la temperatura a la que se encontraría el MIBK más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 20 + 15 = 35^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del tanque. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el MIBK y el incremento de presión causado por la altura del tanque. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,498 \text{ atm}) = 1,723 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 802 \text{ kg/m}^3 * 6,415 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 50.415,6 \text{ kg/ms}^2 = 50.415,6 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 50.415,6 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,498 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este tanque está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.2, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{3,848 \text{ m}}{0,327 \text{ m}} = 11,763$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 4,276 \text{ m} = 3,848 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 3,848 \text{ m} = 0,327 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.2 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una $M= 1,61$. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del tanque (τ_d):

$$\tau_d = \frac{4,9 * 4,276 \text{ m} * (6,415 \text{ m} - 0,3) * \frac{802 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,829 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del tanque es de 2,829 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = \tau_d + \tau_{\text{virola}} = 2,829 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,829 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{\text{lateral}} = 1,5 * 7,829 \text{ mm} = 11,744 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del tanque (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * 4,276 \text{ m} * (6,415 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 3,37 \text{ mm}$$

El modelo a seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del tanque de almacenamiento. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del tanque ($\tau_{op_{cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op_{cabezal}} = \frac{25,33 \text{ psi} * 84,17 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 25,33 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5.016 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 1,723 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 25,33 \text{ psi}$$

$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{4,276 \text{ m}}{2} = 2,138 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 84,17 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{op_{cabezal}} = 1,5 * 5,016 \text{ mm} = 7,52 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del tanque y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 11,744 mm
- Espesor cabezal = 7,52 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 11,744 mm para todo el tanque de almacenamiento.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del tanque:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 4,276 \text{ m} + 2 * 0,011744 \text{ m} = 4,3 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la figura 11.6.

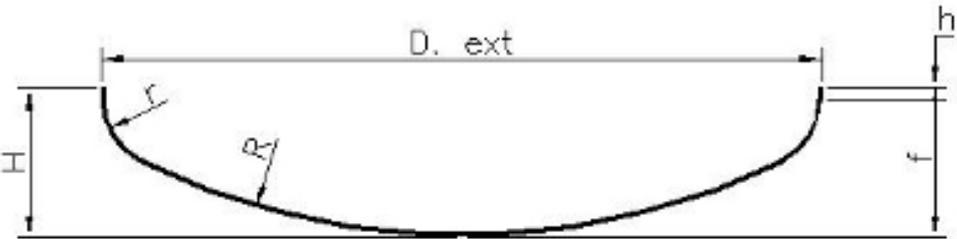
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="4300"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="11.744"/>	
 <p style="text-align: center; font-weight: bold; margin-top: 10px;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="4842"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="4300"/>	
r (mm)	<input type="text" value="430"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="41.104"/>	
f (mm)	<input type="text" value="827"/>	
H (mm)	<input type="text" value="880"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="7821.1"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="1730"/>	

Figura 11.6. Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En la figura 11.6, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En ella, se deduce un volumen de 7821,1 litros, o equivalentemente 7,8211 m³ del fondo del tanque.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del tanque:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{tanque}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 92,13 \text{ m}^3 + 2 \cdot 7,8211 \text{ m}^3 = 107,77 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{\text{cili}} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot 6,415 \text{ m} \cdot ((4,3 \text{ m})^2 - (4,276 \text{ m})^2) \cdot \frac{8000 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$
$$= 8296 \text{ kg}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del tanque:

$$M_{\text{cabezal}} = 0,1 \cdot (D_{\text{ext}}^3 - D_{\text{int}}^3) \cdot \rho = 0,1 \cdot (4,3 \text{ m}^3 - 4,276 \text{ m}^3) \cdot 8000 \text{ kg/m}^3$$
$$= 1059 \text{ kg}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del tanque entero:

$$M_{\text{tanque}} = M_{\text{cili}} + 2 \cdot M_{\text{cabezal}} = 8296 \text{ kg} + 2 \cdot 1059 \text{ kg} = 10414,18 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (4,276 \text{ m})^2 = 14,36 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (6,276 \text{ m})^2 = 39,39 \text{ m}^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot D_c = 4,276 \text{ m} + 2 \cdot 1 \text{ m} = 6,276 \text{ m}$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 39,39 \text{ m}^2 - 14,36 \text{ m}^2 = 25,03 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{\text{tanque}}}{\text{Área libre}} = \frac{92,13 \text{ m}^3}{25,03 \text{ m}^2} = 3,68 \text{ m}$$

$$V_{\text{volumen cubeta}} = \text{Amplitud}^2 \cdot \text{Altura} = (6,276 \text{ m})^2 \cdot 0,223 \text{ m} = 8,784 \text{ m}^3$$

11.3. Mezcladores

Los tanques mezcladores son equipos de procesos ampliamente utilizados en la industria que permiten la mezcla de fases homogéneas y heterogéneas. A lo largo del proceso productivo de líquido epoxi resina en la empresa ResyTech S.L es necesario homogeneizar la mezcla de sustancias para poder cumplir con los objetivos de

producción y calidad del producto. Para ello son necesarios 5 mezcladores distribuidos por las diferentes áreas de la planta.

Se puede decir que un tanque de almacenamiento es igual a un mezclador, con la particularidad de que en este caso es necesaria la introducción de un agitador que permite la mezcla y homogeneización de las sustancias. Por lo tanto, se utiliza el mismo procedimiento a la hora de diseñarlos,

11.3.1 Mezclador T-200

Para saber el volumen del tanque de mezcla de Bisfenol-A y Epiclorhidrina, partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 5 m³/h.

A continuación, se determina el tiempo de residencia de la mezcla en el mezclador según las propiedades de los componentes. En este caso el tiempo de residencia es de 20 minutos (0,333h).

Posteriormente, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr$$

Ecuación 11.9. Volumen de mezcla

Dónde:

- Q= caudal volumetrico de la mezcla (m³/h)
- Tr= tiempo de residencia en el mezclador (h)

Sustituyendo los valores en la ecuación 11.9:

$$V_{mezcla} = Q * tr = \frac{5 \text{ m}^3}{h} * 0,333h = 1,665\text{m}^3 = 1.665 \text{ L}$$

Una vez calculado el volumen total necesario de la mezcla, procedemos a calcular el volumen total del mezclador, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos del contenido.

$$V_{mezclador} = 1,2 * V_{mezcla} = 1,2 * 1,665 \text{ m}^3 = 1,998 \text{ m}^3 = 1.998 \text{ L}$$

Una vez obtenido el valor del volumen del mezclador, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del mezclador es de 1,998 m³.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 1,998 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 1,193 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 1,193 \text{ m} = 1,79 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el mezclador, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el mezclador, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 87,5 + 15 = 102,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del mezclador. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,2045 \text{ atm}) = 1,385 \text{ atm}$$

$$\Delta P = \rho * H * g = 1.181 \text{ kg/m}^3 * 1,79 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 20.717 \text{ kg/ms}^2 = 20.717 \text{ Pa}$$

$$- \Delta P = 20.717 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,2045 \text{ atm}$$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este mezclador está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se de ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.2, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{1,074 \text{ m}}{0,091 \text{ m}} = 11,8$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 1,193 \text{ m} = 1,074 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 1,074 \text{ m} = 0,091 \text{ m}$

Tabla 11.3: Relación entre factor M y coeficiente L/r.

M	1	1,03	1,06	1,08	1,1	1,13	1,15	1,17	1,18	1,2	1,22
L/r	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
M	1,25	1,28	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,46	1,48	1,5
L/r	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
M	1,52	1,54	1,56	1,58	1,6	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,77
L/r	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15	16	16,66

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.3 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{Sd * E} + CA$$

Ecuación 11.10. Espesor de diseño

Dónde:

- τd es el espesor de diseño (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- G es la gravedad específica de diseño del líquido
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- Sd es la tensión admisible en condiciones de diseño (MPa)

Substituyendo los valores en la ecuación 11.10 obtenemos:

$$\tau d = \frac{4,9 * 1,193m * (1,79 m - 0,3) * \frac{1.181kg/m^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2mm = 2,083 mm$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del mezclador es de 2 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\cdot \tau_{op\text{lateral}} = \tau_d + \tau_{virola} = 2,083 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,083 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{op\text{lateral}} = 1,5 * 7,083 \text{ mm} = 10,625 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del mezclador (τt):

$$\tau t = \frac{4,9 * D * (H - 0,3)}{St * E} + CA$$

Ecuación 11.11. Espesor de carcasa

Dónde:

- t es el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- St es la tensión admisible para la prueba hidráulica (MPa)

Substituyendo los valores en la ecuación 11.11 obtenemos:

$$\tau t = \frac{4,9 * 1,193 \text{ m} * (1,79 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,093 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador (τp_{cabezal}), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau p_{\text{cabezal}} = \frac{P * R}{2 * S * E - 0,2 * P} + C1 + C2$$

Ecuación 11.12. Espesor de operación del cabezal

Donde:

- P es la presión de diseño (psi)
- R es el radio (pulgadas)

- S es la tensión admisible (psi)
- E es el factor de soldadura
- C1 es el sobre espesor de corrosión (mm) = 3 mm
- C2 es la tolerancia de fabricación (mm) = 2 mm

Substituyendo los valores en la ecuación 11.12 obtenemos:

$$\tau_{op\text{cabezal}} = \frac{20,36 \text{ psi} * 23,48 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 20,36 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5.004 \text{ mm}$$

- $P = 1,385 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 20,36 \text{ psi}$
- $r = \frac{D}{2} = \frac{1,193 \text{ m}}{2} = 0,597 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 23,48 \text{ pulgadas}$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{\text{cabezal}} = 1,5 * \tau_{op\text{cabezal}} = 1,5 * 5,004 \text{ mm} = 7,506 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del mezclador y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,625 mm
- Espesor cabezal = 7,506 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,625 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del mezclador:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 1,193 \text{ m} + 2 * 0,010625 \text{ m} = 1,214 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones.

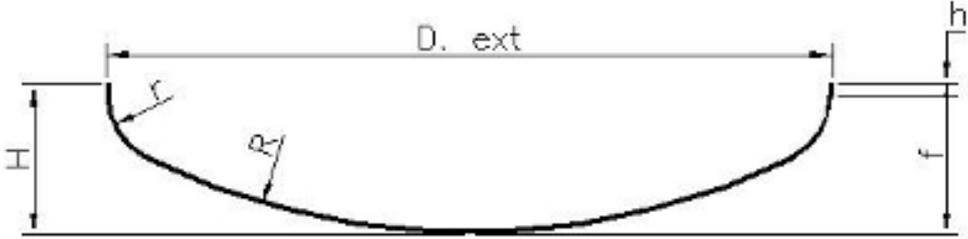
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	1214	
Espesor (mm)	10.625	
 <p style="text-align: center;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	1417	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	1214	
r (mm)	121.4	
h (mm) >=	37.1875	
f (mm)	230	
H (mm)	278	
V (sin h) (litros)	169.7	
Peso (h minima) (kg)	134	

Figura 11.7. Calculadora de parámetros del fondo toriesférico de Kloppe.

En la figura 11.7, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En ella, se deduce un volumen de 169,7 litros, o equivalentemente 0,1697 m³ del fondo del mezclador.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del mezclador:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{mezclador}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 1,998 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,1697 \text{ m}^3 = 2,337 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$\begin{aligned} M_{\text{cili}} &= \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \cdot \rho \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot 1,79 \text{ m} \cdot ((1,214 \text{ m})^2 - (1,193 \text{ m})^2) \cdot \frac{1.181 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 83,92 \text{ kg} \end{aligned}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del mezclador:

$$\begin{aligned} M_{\text{cabezal}} &= 0,1 \cdot (D_{\text{ext}}^3 - D_{\text{int}}^3) \cdot \rho = 0,1 \cdot ((1,214 \text{ m})^3 - (1,193 \text{ m})^3) \cdot 1.181 \text{ kg/m}^3 \\ &= 10,78 \text{ kg} \end{aligned}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del mezclador entero:

$$M_{\text{tanque}} = M_{\text{cili}} + 2 \cdot M_{\text{cabezal}} = 83,92 \text{ kg} + 2 \cdot 10,78 \text{ kg} = 105,48 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del mezclador:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (1,193 \text{ m})^2 = 1,118 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (3,214 \text{ m})^2 = 10,33 \text{ m}^2$$

- Amplitud cubeta = $D + 2 \cdot D_c = 1,214 \text{ m} + 2 \cdot 1 \text{ m} = 3,214 \text{ m}$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 10,33 \text{ m}^2 - 1,118 \text{ m}^2 = 9,21 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{\text{mezclador}}}{\text{Área libre}} = \frac{1,998 \text{ m}^3}{9,21 \text{ m}^2} = 0,217 \text{ m}$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Amplitud}^2 \cdot \text{Altura} = (3,214 \text{ m})^2 \cdot 0,217 \text{ m} = 2,242 \text{ m}^3$$

La agitación es un parámetro muy importante en los tanques de mezcla para asegurar la correcta homogeneización de todo su contenido, así como mantener los sólidos en suspensión, asegurar una correcta transferencia de energía entre todos los puntos del mezclador y mejorar la difusión del oxígeno en el fluido.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que la agitación puede provocar la formación de espumas en la superficie del tanque, puede evitar o retrasar la disipación del calor de reacción generado y puede causar la muerte celular si no se realiza un diseño correcto.

Una forma de optimizar el rendimiento del agitador y evitar que se formen vórtices es añadir deflectores en las paredes del mezclador, que son pantallas que cortan el paso del fluido para provocar turbulencias y aumentar así el Reynolds.

El diseño de los agitadores para los tanques de mezcla en la planta ResyTech se basa en el modelo de agitación tipo turbina, que consta de un agitador de palas planas encastadas sobre un disco perpendicular al eje de rotación.



Primeramente, se calcula el diámetro del agitador (D_a), que será igual a la altura desde la base del mezclador (E):

$$D_a = E = \frac{D_{mezclador}}{3} = \frac{1,193m}{3} = 0,398 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro del agitador, se procede a calcular la amplitud del deflector (J):

$$J = \frac{D_{mezclador}}{12} = \frac{1,193m}{12} = 0,1 m$$

Seguidamente, se calcula la altura de la pala del agitador:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0,398 m}{5} = 0,08m$$

También se calcula la amplitud de la pala del agitador:

$$L = \frac{Da}{4} = \frac{1,193 \text{ m}}{4} = 0,298 \text{ m}$$

Y finalmente, se procede a calcular la altura del agitador:

$$H = W + H - E = 0,08\text{m} + 1,79\text{m} - 0,398\text{m} = 1,472 \text{ m}$$

Reynolds

El Reynolds es un parámetro que indica el régimen de circulación de un fluido. Para que se dé una buena mezcla en el mezclador, el régimen de circulación debe ser turbulento. Es decir, un Reynolds superior a 10^5 .

$$Re = \frac{\rho * v * Da}{\mu}$$

Dónde:

- ρ = Densidad de la mezcla (Kg/m³)
- μ = Viscosidad de la mezcla
- v = Velocidad a la que gira el agitador
- Da = Diámetro del agitador

Sustituyendo los valores en la ecuación 11.12 y mediante un proceso iterativo de la velocidad de agitación para obtener un Reynolds turbulento, pero no demasiado elevado para optimizar costes:

$$Re = \frac{\rho * v * Da}{\mu} = \frac{1.181\text{kg/m}^3 * 2,19\text{m/s} * 0,398\text{m}}{0,00103 \text{ kg/ms}} = 10 * 10^5$$

Determinación del número de potencia

A través del número de Reynolds calculado en el apartado anterior y observando la gráfica de la figura 11.7, es posible determinar el número de potencia de agitación requerido.

Las diferentes curvas indican los diferentes valores del número de potencia en función del tipo de agitación que se lleva a cabo. En el caso de la empresa Resytech S.L se ha

decidido utilizar agitadores de palas planas encastadas y, por lo tanto, hay que fijarse en la curva que hace referencia a este tipo de agitación.

Para valores elevados del número de potencia se observa que el número de Reynolds tiene un valor constante e igual a 5.

Cálculo de la potencia necesaria

Para determinar la potencia de agitación se utiliza la ecuación 11.13.

$$P = \frac{Da^5 * Np * v^3 * \rho}{g * 1000}$$

Ecuación 11.13. Potencia de la agitación

- P= Potencia de agitación (Kw)
- Da= Diámetro de agitador (m)
- Np= Número de potencia (-)
- v= Velocidad de agitación (m/s)
- ρ = Densidad de la mezcla (Kg/m³)
- g= Gravedad (m/s²)

Substituyendo los valores en la ecuación:

$$P = \frac{0,398^5 * 5 * 2,19^3 * 1181}{9,8 * 1000} = 0,07kw$$

Por último, se calculan las revoluciones por minuto mediante la ecuación 11.14:

$$RPM = \frac{Vc * 60}{\pi * Da}$$

Ecuación 11.14. Revoluciones por minuto

- Vc= velocidad de corte (m/s)
- Da= diámetro del agitador (m)

Substituyendo los valores en la ecuación:

$$RPM = \frac{Vc * 60}{\pi * Da} = \frac{2,19m/s * 60s}{\pi * 0,398m} = 105 rpm$$

11.3.2. Mezclador T-109

Para saber el volumen del tanque de mezcla de BTAC y agua, para conseguir BTAC al 60%, partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 0,02 m³/h.

A continuación, se determina el tiempo de residencia de la mezcla en el mezclador según las propiedades de los componentes. En este caso el tiempo de residencia es de 15 minutos (0,25h).

Posteriormente, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr = \frac{0,02m^3}{h} * 0,25h = 0,005m^3 = 5L$$

Una vez calculado el volumen total necesario de la mezcla, procedemos a calcular el volumen total del mezclador, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos del contenido.

$$V_{mezclador} = 1,2 * V_{mezcla} = 1,2 * 0,005 m^3 = 0,006 m^3 = 6L$$

Una vez obtenido el valor del volumen del mezclador, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del mezclador es de 0,006 m³.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,006 m^3}{1,5 * \pi}} = 0,173 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 0,173 \text{ m} = 0,26 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el mezclador, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el mezclador, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 20 + 15 = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del mezclador. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,0262 \text{ atm}) = 1,18 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.042 \text{ kg/m}^3 * 0,26 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 2.655 \text{ kg/ms}^2 = 2.655 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 2.655 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,0262 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este mezclador está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se de ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: E=0,8.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.3, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{0,156 \text{ m}}{0,013 \text{ m}} = 11,787$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 0,173 \text{ m} = 0,156 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 0,156 \text{ m} = 0,013 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.3 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * 0,173 \text{ m} * (0,26 \text{ m} - 0,3) * \frac{1042 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del mezclador es de 2 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

- $\tau_{\text{lateral}} = \tau d + \tau_{\text{virola}} = 2 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7 \text{ mm}$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\tau_{lateral} = 1,5 * \tau_{op_{lateral}} = 1,5 * 7 \text{ mm} = 10,5 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del mezclador (τt):

$$\tau t = \frac{4,9 * 0,173 \text{ m} * (0,26 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador ($\tau_{op_{cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op_{cabezal}} = \frac{17,35 \text{ psi} * 3,41 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 17,35 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5,0004 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 1,18 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 17,35 \text{ psi}$$

$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{0,173 \text{ m}}{2} = 0,087 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 3,41 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{op_{cabezal}} = 1,5 * 5,0004 \text{ mm} = 7,5 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del mezclador y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,5 mm
- Espesor cabezal = 7,5 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,5 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del mezclador:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 0,173 \text{ m} + 2 * 0,0105 \text{ m} = 0,194 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones.

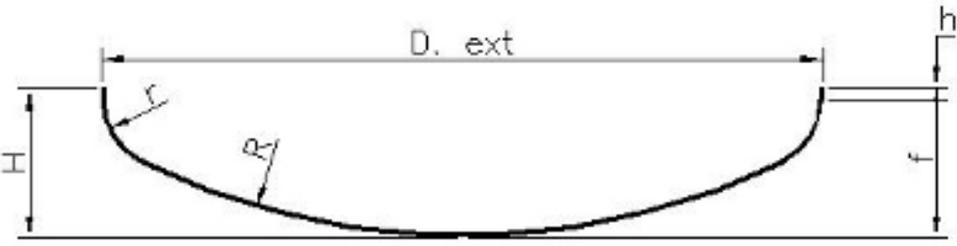
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	194	
Espesor (mm)	10.5	
 <p style="text-align: center;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	287	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	194	
r (mm)	19.40	
h (mm) >=	36.75	
f (mm)	33	
H (mm)	80	
V (sin h) (litros)	0.5	
Peso (h minima) (kg)	5	

Figura 11.8: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En la figura 11.8, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En ella, se deduce un volumen de 0,5 litros, o equivalentemente 0,0005 m³ del fondo del mezclador.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del mezclador:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{mezclador}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 0,006 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,0005 \text{ m}^3 = 0,007 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$\begin{aligned} M_{\text{cili}} &= \frac{\pi}{4} * H * (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \cdot \rho \\ &= \frac{\pi}{4} * 0,26 \text{ m} * ((0,194 \text{ m})^2 - (0,173 \text{ m})^2) * \frac{8000 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 12,59 \text{ kg} \end{aligned}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del mezclador:

$$\begin{aligned} M_{\text{cabezal}} &= 0,1 * (D_{\text{ext}}^3 - D_{\text{int}}^3) * \rho = 0,1 * ((0,194 \text{ m})^3 - (0,173 \text{ m})^3) * 8000 \text{ kg/m}^3 \\ &= 1,7 \text{ kg} \end{aligned}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del mezclador entero:

$$M_{\text{tanque}} = M_{\text{cili}} + 2 * M_{\text{cabezal}} = 12,59 \text{ kg} + 2 * 1,7 \text{ kg} = 16 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del mezclador:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * (0,194 \text{ m})^2 = 0,03 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (2,194 \text{ m})^2 = 4,81 \text{ m}^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot D_c = 0,194 \text{ m} + 2 \cdot 1 \text{ m} = 2,194 \text{ m}$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 4,81 \text{ m}^2 - 0,03 \text{ m}^2 = 4,78 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{\text{mezclador}}}{\text{Área libre}} = \frac{0,006 \text{ m}^3}{4,78 \text{ m}^2} = 0,0013 \text{ m}$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Amplitud}^2 * \text{Altura} = (2,194 \text{ m})^2 * 0,0013 \text{ m} = 0,0063 \text{ m}^3$$

La agitación es un parámetro muy importante en los tanques de mezcla para asegurar la correcta homogeneización de todo su contenido, así como mantener los sólidos en suspensión, asegurar una correcta transferencia de energía entre todos los puntos del mezclador y mejorar la difusión del oxígeno en el fluido.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que la agitación puede provocar la formación de espumas en la superficie del tanque, puede evitar o retrasar la disipación del calor de reacción generado y puede causar la muerte celular si no se realiza un diseño correcto.

Una forma de optimizar el rendimiento del agitador y evitar que se formen vórtices es añadir deflectores en las paredes del mezclador, que son pantallas que cortan el paso del fluido para provocar turbulencias y aumentar así el Reynolds.

El diseño de los agitadores para los tanques de mezcla en la planta ResyTech se basa en el modelo de agitación tipo turbina, que consta de un agitador de palas planas encastadas sobre un disco perpendicular al eje de rotación.

Primeramente, se calcula el diámetro del agitador (D_a), que será igual a la altura desde la base del mezclador (E):

$$D_a = E = \frac{D_{mezclador}}{3} = \frac{0,173m}{3} = 0,058 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro del agitador, se procede a calcular la amplitud del deflector (J):

$$J = \frac{D_{mezclador}}{12} = \frac{0,173m}{12} = 0,014m$$

Seguidamente, se calcula la altura de la pala del agitador:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0,058 m}{5} = 0,012m$$

También se calcula la amplitud de la pala del agitador:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0,058 m}{4} = 0,0145 m$$

Y finalmente, se procede a calcular la altura del agitador:

$$H = W + H - E = 0,012m + 0,26m - 0,058m = 0,214m$$

Reynolds

El Reynolds es un parámetro que indica el régimen de circulación de un fluido. Para que se de una buena mezcla en el mezclador, el régimen de circulación debe ser turbulento. Es decir, un Reynolds superior a 10^5 .

Sustituyendo los valores en la ecuación x y mediante un proceso iterativo de la velocidad de agitación para obtener un Reynolds turbulento, pero no demasiado elevado para optimizar costes:

$$Re = \frac{\rho * v * Da}{\mu} = \frac{1042kg/m^3 * 1,99m/s * 0,058m}{0,0012kg/ms} = 10^5$$

Determinación del número de potencia

A través del número de Reynolds calculado en el apartado anterior y observando la gráfica de la figura 11.8, es posible determinar el número de potencia de agitación requerido.

Las diferentes curvas indican los diferentes valores del número de potencia en función del tipo de agitación que se lleva a cabo. En el caso de la empresa Resytech S.L se ha decidido utilizar agitadores de palas planas encastadas y, por lo tanto, hay que fijarse en la curva que hace referencia a este tipo de agitación.

Para valores elevados del número de potencia se observa que el número de Reynolds tiene un valor constante e igual a 5.

Cálculo de la potencia necesaria

Substituyendo los valores en la ecuación:

$$P = \frac{0,058^5 * 5 * 1,99^3 * 1042}{9,8 * 1000} = 27,5 * 10^{-7}kw$$

Por último, se calculan las revoluciones por minuto:

$$RPM = \frac{Vc * 60}{\pi * Da}$$

- Vc= velocidad de corte (m/s)
- Da= diámetro del agitador (m)

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$RPM = \frac{Vc * 60}{\pi * Da} = \frac{1,99m/s * 60s}{\pi * 0,058m} = 655 rpm$$

11.3.3 Mezclador T-500

Para saber el volumen del tanque de mezcla T-500, partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 2,017 m³/h.

A continuación, se determina el tiempo de residencia de la mezcla en el mezclador según las propiedades de los componentes. En este caso el tiempo de residencia es de 20 minutos (0,333h).

Posteriormente, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr = \frac{2,017m^3}{h} * 0,333h = 0,6722m^3 = 672,2L$$

Una vez calculado el volumen total necesario de la mezcla, procedemos a calcular el volumen total del mezclador, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos del contenido.

$$V_{mezclador} = 1,2 * V_{mezcla} = 1,2 * 0,6722 m^3 = 0,8067 m^3 = 806,7L$$

Una vez obtenido el valor del volumen del mezclador, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del mezclador es de 806,7 litros.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,8067 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 0,88 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 0,88 \text{ m} = 1,322 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el mezclador, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el mezclador, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 80 + 15 = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del mezclador. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (0,3 \text{ atm} + 0,0936 \text{ atm}) = 0,4526 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.100,04 \text{ kg/m}^3 * 0,88 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 9.486,74 \text{ kg/ms}^2 = 9.486,74 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 9.486,74 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,0936 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este mezclador está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se de ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal tori esférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la Tabla 11.3, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{0,792 \text{ m}}{0,0673 \text{ m}} = 11,76$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 0,88 \text{ m} = 0,792 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 0,792 \text{ m} = 0,0673 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la [tabla 11.3](#) para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una $M= 1,61$. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * 0,88 \text{ m} * (1,322 \text{ m} - 0,3) * \frac{1100,04 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,039 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del mezclador es de 2 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = \tau_d + \tau_{\text{virola}} = 2,039 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,039 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\cdot \tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{\text{op lateral}} = 1,5 * 7,039 \text{ mm} = 10,55 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del mezclador (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * 0,88 \text{ m} * (1,322 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,031 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador ($\tau_{\text{op cabeza}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{op cabeza}} = \frac{6,65 \text{ psi} * 17,32 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 6,65 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5,0008 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 0,4526 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 6,65 \text{ psi}$$

$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{0,88 \text{ m}}{2} = 0,44 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 17,32 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{\text{cabezal}} = 1,5 * \tau_{\text{op cabeza}} = 1,5 * 5,0008 \text{ mm} = 7,5 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del mezclador y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,55mm
- Espesor cabezal = 7,5 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,55 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del mezclador:

$$D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} + 2 * \tau_{\text{lateral}} = 0,88 \text{ m} + 2 * 0,01055 \text{ m} = 0,9011 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones.

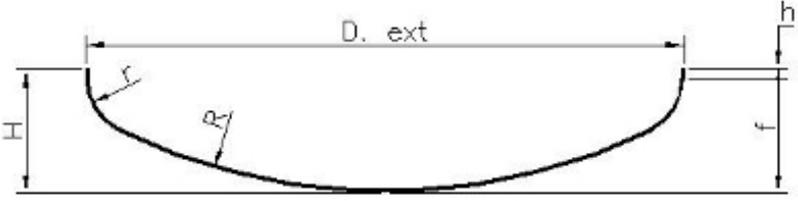
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="901.1"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="10.55"/>	
 <p>fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="1070"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="901.1"/>	
r (mm)	<input type="text" value="90.11000000"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="36.92500000"/>	
f (mm)	<input type="text" value="170"/>	
H (mm)	<input type="text" value="217"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="68.1"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="76"/>	
HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.		

Figura 11.9: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En la figura 11.9, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En ella, se deduce un volumen de 68,1 litros, o equivalentemente 0,0681 m³ del fondo del mezclador.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del mezclador:

$$V \text{ tanque final} = V_{\text{mezclador}} + 2 * V_{\text{cabezal}} = 0,8067 \text{ m}^3 + 2 * 0,0681 \text{ m}^3 = 0,943 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{cili} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho$$
$$= \frac{\pi}{4} * 1,322m * ((0,9011m)^2 - (0,88m)^2) * \frac{8000kg}{m^3} = 312,16 kg$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del mezclador:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * ((0,9011m)^3 - (0,88m)^3) * 8000kg/m^3$$
$$= 40,16 kg$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del mezclador entero:

$$M_{tanque} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 312,16 kg + 2 * 40,16 kg = 392,48 kg$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del mezclador:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * (0,88 m)^2 = 0,608 m^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (2,88m)^2 = 8,29 m^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot Dc = 0,88m + 2 \cdot 1m = 2,88m$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 8,29 m^2 - 0,608m^2 = 7,682 m^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{mezclador}}{\text{Área libre}} = \frac{0,8067 m^3}{7,682 m^2} = 0,105m$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Amplitud}^2 * \text{Altura} = (2,88m)^2 * 0,105m = 0,87 m^3$$

La agitación es un parámetro muy importante en los tanques de mezcla para asegurar la correcta homogeneización de todo su contenido, así como mantener los sólidos en suspensión, asegurar una correcta transferencia de energía entre todos los puntos del mezclador y mejorar la difusión del oxígeno en el fluido.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que la agitación puede provocar la formación de espumas en la superficie del tanque, puede evitar o retrasar la disipación del calor de reacción generado y puede causar la muerte celular si no se realiza un diseño correcto.

Una forma de optimizar el rendimiento del agitador y evitar que se formen vórtices es añadir deflectores en las paredes del mezclador, que son pantallas que cortan el paso del fluido para provocar turbulencias y aumentar así el Reynolds.

El diseño de los agitadores para los tanques de mezcla en la planta ResyTech se basa en el modelo de agitación tipo turbina, que consta de un agitador de palas planas encastadas sobre un disco perpendicular al eje de rotación.

Primeramente, se calcula el diámetro del agitador (D_a), que será igual a la altura desde la base del mezclador (E):

$$D_a = E = \frac{D_{mezclador}}{3} = \frac{0,88m}{3} = 0,293 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro del agitador, se procede a calcular la amplitud del deflector (J):

$$J = \frac{D_{mezclador}}{12} = \frac{0,88m}{12} = 0,073m$$

Seguidamente, se calcula la altura de la pala del agitador:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0,293 m}{5} = 0,0586m$$

También se calcula la amplitud de la pala del agitador:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0,293 m}{4} = 0,0732 m$$

Y finalmente, se procede a calcular la altura del agitador:

$$H = W + H - E = 0,0586m + 1,322m - 0,293m = 1,087m$$

Reynolds

El Reynolds es un parámetro que indica el régimen de circulación de un fluido. Para que se dé una buena mezcla en el mezclador, el régimen de circulación debe ser turbulento. Es decir, un Reynolds superior a 10^5 .

Sustituyendo los valores en la ecuación x y mediante un proceso iterativo de la velocidad de agitación para obtener un Reynolds turbulento, pero no demasiado elevado para optimizar costes:

$$Re = \frac{\rho * v * Da}{\mu} = \frac{1100,04 \text{ kg/m}^3 * 2,17 \text{ m/s} * 0,293 \text{ m}}{0,007 \text{ kg/ms}} = 10^5$$

Determinación del número de potencia

A través del número de Reynolds calculado en el apartado anterior y observando la gráfica de la figura 11.9 que se muestra a continuación, es posible determinar el número de potencia de agitación requerido.

Las diferentes curvas indican los diferentes valores del número de potencia en función del tipo de agitación que se lleva a cabo. En el caso de la empresa Resytech S.L se ha decidido utilizar agitadores de palas planas encastadas y, por lo tanto, hay que fijarse en la curva que hace referencia a este tipo de agitación.

Para valores elevados del número de potencia se observa que el número de Reynolds tiene un valor constante e igual a 5.

Cálculo de la potencia necesaria

Para determinar la potencia de agitación se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = \frac{0,293^5 * 5 * 2,17^3 * 1100,04}{9,8 * 1000} = 2,48 * 10^{-3} \text{ kw}$$

Por último, se calculan las revoluciones por minuto::

$$RPM = \frac{Vc * 60}{\pi * Da} = \frac{2,17 \text{ m/s} * 60 \text{ s}}{\pi * 0,293 \text{ m}} = 141 \text{ rpm}$$

11.3.4 Mezclador T-301

Para saber el volumen del tanque de mezcla T-300, partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 2,079 m³/h.

A continuación, se determina el tiempo de residencia de la mezcla en el mezclador según las propiedades de los componentes. En este caso el tiempo de residencia es de 20 minutos (0,333h).

Posteriormente, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr = \frac{2,079m^3}{h} * 0,333h = 0,693 m^3 = 693 L$$

Una vez calculado el volumen total necesario de la mezcla, procedemos a calcular el volumen total del mezclador, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos del contenido.

$$V_{mezclador} = 1,2 * V_{mezcla} = 1,2 * 0,693 m^3 = 0,8314 m^3 = 831,4 L$$

Una vez obtenido el valor del volumen del mezclador, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del mezclador es de 831,4 litros.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,8314 m^3}{1,5 * \pi}} = 0,89 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 0,89 \text{ m} = 1,335 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el mezclador, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el mezclador, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 25 + 15 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del mezclador. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,1043 \text{ atm}) = 1,27 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.212,04 \text{ kg/m}^3 * 0,89 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 10.571,41 \text{ kg/ms}^2 = 10.571,41 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 10.571,41 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,1043 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este mezclador está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: E=0,8.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la Tabla 11.3, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{0,792 \text{ m}}{0,0673 \text{ m}} = 11,76$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 0,89 \text{ m} = 0,801 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 0,801 \text{ m} = 0,068 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.3 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * 0,89 * (1,335 \text{ m} - 0,3) * \frac{1212,04 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,044 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del mezclador es de 2 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

$$\tau_{\text{lateral}} = \tau d + \tau_{\text{virola}} = 2,044 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,044 \text{ mm}$$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

$$\tau_{lateral} = 1,5 * \tau_{op_{lateral}} = 1,5 * 7,044 \text{ mm} = 10,56 \text{ mm}$$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del mezclador (τt):

$$\tau t = \frac{4,9 * 0,89 \text{ m} * (1,335 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,048 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador ($\tau_{op_{cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op_{cabezal}} = \frac{18,669 \text{ psi} * 17,52 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 18,669 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5,00243 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 1,27 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 18,669 \text{ psi}$$

$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{0,89 \text{ m}}{2} = 0,445 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 17,52 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{op_{cabezal}} = 1,5 * 5,00243 \text{ mm} = 7,5 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del mezclador y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,56 mm
- Espesor cabezal = 7,5 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,56 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del mezclador:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 0,89 \text{ m} + 2 * 0,01056 \text{ m} = 0,911 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la figura 11.10.

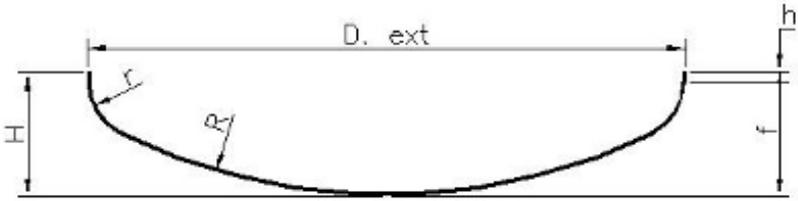
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="911"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="10.56"/>	
 <p>fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="1081"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="911"/>	
r (mm)	<input type="text" value="91.100000000"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="36.96"/>	
f (mm)	<input type="text" value="171"/>	
H (mm)	<input type="text" value="219"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="70.5"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="78"/>	

Figura 11.10: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En la figura 11.10, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Klopper.

En ella, se deduce un volumen de 70,5 litros, o equivalentemente 0,0705 m³ del fondo del mezclador.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del mezclador:

$$V \text{ tanque final} = V_{\text{mezclador}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 0,8314 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,0705 \text{ m}^3 = 0,9724 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{cili} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho$$
$$= \frac{\pi}{4} * 1,335m * ((0,911m)^2 - (0,89m)^2) * \frac{8000kg}{m^3} = 317,24 kg$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del mezclador:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * ((0,911m)^3 - (0,89m)^3) * 8000kg/m^3$$
$$= 40,87 kg$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del mezclador entero:

$$M_{tanque} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 317,24 kg + 2 * 40,87 kg = 398,98 kg$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del mezclador:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * (0,89 m)^2 = 0,622 m^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (2,89m)^2 = 8,352 m^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot Dc = 0,89m + 2 \cdot 1m = 2,89m$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 8,352 m^2 - 0,622m^2 = 7,73m^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{mezclador}}{\text{Área libre}} = \frac{0,8314 m^2}{7,73 m^2} = 0,1075 m$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Amplitud}^2 * \text{Altura} = (2,89m)^2 * 0,1075m = 0,8983 m^3$$

La agitación es un parámetro muy importante en los tanques de mezcla para asegurar la correcta homogeneización de todo su contenido, así como mantener los sólidos en suspensión, asegurar una correcta transferencia de energía entre todos los puntos del mezclador y mejorar la difusión del oxígeno en el fluido.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que la agitación puede provocar la formación de espumas en la superficie del tanque, puede evitar o retrasar la disipación del calor de reacción generado y puede causar la muerte celular si no se realiza un diseño correcto.

Una forma de optimizar el rendimiento del agitador y evitar que se formen vórtices es añadir deflectores en las paredes del mezclador, que son pantallas que cortan el paso del fluido para provocar turbulencias y aumentar así el Reynolds.

El diseño de los agitadores para los tanques de mezcla en la planta ResyTech se basa en el modelo de agitación tipo turbina, que consta de un agitador de palas planas encastadas sobre un disco perpendicular al eje de rotación.

Primeramente, se calcula el diámetro del agitador (D_a), que será igual a la altura desde la base del mezclador (E):

$$D_a = E = \frac{D_{mezclador}}{3} = \frac{0,89m}{3} = 0,296 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro del agitador, se procede a calcular la amplitud del deflector (J):

$$J = \frac{D_{mezclador}}{12} = \frac{0,89m}{12} = 0,074m$$

Seguidamente, se calcula la altura de la pala del agitador:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0,296 m}{5} = 0,0592m$$

También se calcula la amplitud de la pala del agitador:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0,296 m}{4} = 0,074 m$$

Y finalmente, se procede a calcular la altura del agitador:

$$H = W + H - E = 0,0592m + 1,335m - 0,296m = 1,098 m$$

Reynolds

El Reynolds es un parámetro que indica el régimen de circulación de un fluido. Para que se de una buena mezcla en el mezclador, el régimen de circulación debe ser turbulento. Es decir, un Reynolds superior a 10^5 .

Sustituyendo los valores en la ecuación x y mediante un proceso iterativo de la velocidad de agitación para obtener un Reynolds turbulento, pero no demasiado elevado para optimizar costes:

$$Re = \frac{\rho * v * Da}{\mu} = \frac{1212,04 \text{ kg/m}^3 * 0,28 \text{ m/s} * 0,296 \text{ m}}{0,001 \text{ kg/ms}} = 10^5$$

Determinación del número de potencia

A través del número de Reynolds calculado en el apartado anterior y observando la gráfica de la figura 11.10, es posible determinar el número de potencia de agitación requerido.

Las diferentes curvas indican los diferentes valores del número de potencia en función del tipo de agitación que se lleva a cabo. En el caso de la empresa Resytech S.L se ha decidido utilizar agitadores de palas planas encastadas y, por lo tanto, hay que fijarse en la curva que hace referencia a este tipo de agitación.

Para valores elevados del número de potencia se observa que el número de Reynolds tiene un valor constante e igual a 5.

Cálculo de la potencia necesaria

Para determinar la potencia de agitación se utiliza la ecuación:

$$P = \frac{0,296^5 * 5 * 0,28^3 * 1212,04}{9,8 * 1000} = 30,84 * 10^{-6} \text{ kw}$$

Por último, se calculan las revoluciones por minuto:

$$RPM = \frac{Vc * 60}{\pi * Da} = \frac{0,28 \text{ m/s} * 60 \text{ s}}{\pi * 0,296 \text{ m}} = 18 \text{ rpm}$$

11.3.5. Mezclador T-300

Para saber el volumen del tanque de mezcla T-300, partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 2,378 m³/h.

A continuación, se determina el tiempo de residencia de la mezcla en el mezclador según las propiedades de los componentes. En este caso el tiempo de residencia es de 20 minutos (0,333h).

Posteriormente, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr = \frac{2,378m^3}{h} * 0,333h = 0,793 m^3 = 793 L$$

Una vez calculado el volumen total necesario de la mezcla, procedemos a calcular el volumen total del mezclador, que, por motivos de seguridad, multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2. Este sobredimensionamiento se realiza para que no hayan vertidos del contenido.

$$V_{mezclador} = 1,2 * V_{mezcla} = 1,2 * 0,793 m^3 = 0,9514 m^3 = 951,4 L$$

Una vez obtenido el valor del volumen del mezclador, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, sabiendo que el volumen del mezclador es de 951,4 litros.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,8314 m^3}{1,5 * \pi}} = 0,931 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 0,89 \text{ m} = 1,397 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el mezclador, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el mezclador, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 80 + 15 = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del mezclador. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (0,3 \text{ atm} + 0,157 \text{ atm}) = 0,525 \text{ atm}$$

- $\Delta P = \rho * H * g = 1.160,26 \text{ kg/m}^3 * 1,397 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 15.884,65 \text{ kg/ms}^2 = 15.884,65 \text{ Pa}$
- $\Delta P = 15.884,65 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,157 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este mezclador está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Limite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: E=0,8.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klepper. Para obtener el factor M, se emplea la tabla 11.3, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{0,792 \text{ m}}{0,0673 \text{ m}} = 11,76$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 0,931 \text{ m} = 0,838 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 0,838 \text{ m} = 0,0712 \text{ m}$

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla 11.3 para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{Sd * E} + CA$$

Dónde:

- τd es el espesor de diseño (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)

- G es la gravedad específica de diseño del líquido
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- Sd es la tensión admisible en condiciones de diseño (MPa)

Substituyendo los valores en la ecuación X obtenemos:

$$\tau d = \frac{4,9 * 0,931 m * (1,397 m - 0,3) * \frac{1160,26 kg/m^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2mm = 2,0468 mm$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del mezclador es de 2 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

- $\tau_{op\ lateral} = \tau d + \tau_{virola} = 2,0468 mm + 5 mm = 7,0468 mm$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

- $\tau_{lateral} = 1,5 * \tau_{op\ lateral} = 1,5 * 7,0468 mm = 10,57 mm$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del mezclador (τt):

$$\tau t = \frac{4,9 * 0,931 m * (1,397 m - 0,3)}{117 * 0,8} + 2mm = 2,0534 mm$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesferico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador ($\tau_{op\ cabezal}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op\ cabezal} = \frac{7,725 psi * 18,32 pulgadas}{2 * 84122 psi * 0,8 - 0,2 * 7,725 psi} + 3 + 2 = 5.001 mm$$

- $P = 0,525 atm * \frac{14,7 psi}{atm} = 7,725 psi$
- $r = \frac{D}{2} = \frac{0,931 m}{2} = 0,4655 m * \frac{39,37 pulgadas}{m} = 18,32 pulgadas$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{cabezal} = 1,5 * \tau_{op\ cabezal} = 1,5 * 5,001 mm = 7,501 mm$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del mezclador y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,56 mm
- Espesor cabezal = 7,5 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,56 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del mezclador:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 0,931m + 2 * 0,01056m = 0,952 m$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la figura 11.11.

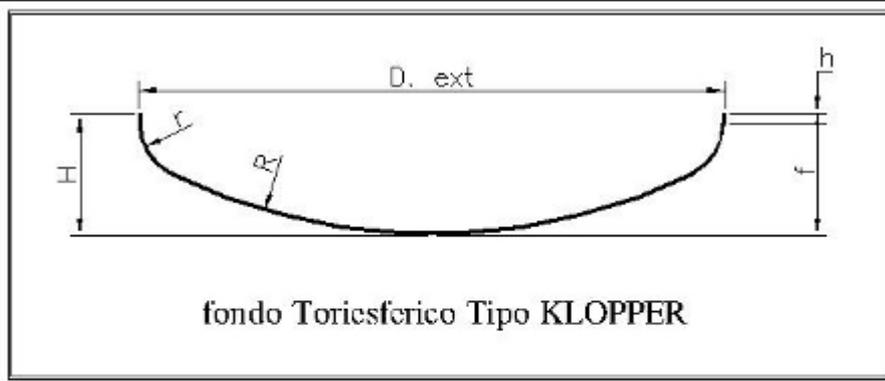
Calculadora de fondos KLOPPER	
Diametro exterior (mm)	952
Espesor (mm)	10.56
 <p style="text-align: center;">fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>	
Diametro disco (mm)	1127
R (mm)	952
r (mm)	95.2
h (mm) >=	36.96
f (mm)	179
H (mm)	227
V (sin h) (litros)	80.7
Peso (h minima) (kg)	84
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Calcular</div>	

Figura 11.11: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En la figura 11.11, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En ella, se deduce un volumen de 80,7 litros, o equivalentemente 0,0807 m³ del fondo del mezclador.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del mezclador:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{mezclador}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 0,9514 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,0807 \text{ m}^3 = 1,113 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{\text{cili}} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot 1,397 \cdot ((0,952\text{m})^2 - (0,931\text{m})^2) \cdot \frac{8000\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= 347,09 \text{ kg}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del mezclador:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * ((0,952m)^3 - (0,931m)^3) * 8000kg/m^3$$
$$= 44,67 \text{ kg}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del mezclador entero:

$$M_{tanque} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 347,09 \text{ kg} + 2 * 44,67 \text{ kg} = 436,43 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del mezclador:

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * (0,931 \text{ m})^2 = 0,68 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cubeta} = \text{Amplitud cubeta}^2 = (2,931m)^2 = 8,59 \text{ m}^2$$

- $\text{Amplitud cubeta} = D + 2 \cdot D_c = 0,931m + 2 \cdot 1m = 2,931m$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 8,59 \text{ m}^2 - 0,68m^2 = 7,91m^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{mezclador}}{\text{Área libre}} = \frac{0,9514 \text{ m}^3}{7,91 \text{ m}^2} = 0,12 \text{ m}$$

$$\text{Volumen cubeta} = \text{Amplitud}^2 * \text{Altura} = (2,931m)^2 * 0,12m = 1,033 \text{ m}^3$$

La agitación es un parámetro muy importante en los tanques de mezcla para asegurar la correcta homogeneización de todo su contenido, así como mantener los sólidos en suspensión, asegurar una correcta transferencia de energía entre todos los puntos del mezclador y mejorar la difusión del oxígeno en el fluido.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que la agitación puede provocar la formación de espumas en la superficie del tanque, puede evitar o retrasar la disipación del calor de reacción generado y puede causar la muerte celular si no se realiza un diseño correcto.

Una forma de optimizar el rendimiento del agitador y evitar que se formen vórtices es añadir deflectores en las paredes del mezclador, que son pantallas que cortan el paso del fluido para provocar turbulencias y aumentar así el Reynolds.

El diseño de los agitadores para los tanques de mezcla en la planta ResyTech se basa en el modelo de agitación tipo turbina, que consta de un agitador de palas planas encastadas sobre un disco perpendicular al eje de rotación.

Primeramente, se calcula el diámetro del agitador (D_a), que será igual a la altura desde la base del mezclador (E):

$$D_a = E = \frac{D_{mezclador}}{3} = \frac{0,931m}{3} = 0,31 m$$

Una vez obtenido el valor del diámetro del agitador, se procede a calcular la amplitud del deflector (J):

$$J = \frac{D_{mezclador}}{12} = \frac{0,931m}{12} = 0,077m$$

Seguidamente, se calcula la altura de la pala del agitador:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0,31 m}{5} = 0,062m$$

También se calcula la amplitud de la pala del agitador:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0,31 m}{4} = 0,0775 m$$

Y finalmente, se procede a calcular la altura del agitador:

$$H = W + H - E = 0,062m + 1,397m - 0,31m = 1,149 m$$

Reynolds

El Reynolds es un parámetro que indica el régimen de circulación de un fluido. Para que se dé una buena mezcla en el mezclador, el régimen de circulación debe ser turbulento. Es decir, un Reynolds superior a 10^5 .

Sustituyendo los valores en la ecuación x y mediante un proceso iterativo de la velocidad de agitación para obtener un Reynolds turbulento, pero no demasiado elevado para optimizar costes:

$$Re = \frac{\rho * v * Da}{\mu} = \frac{1212,04 \text{ kg/m}^3 * 0,21\text{m/s} * 0,31\text{m}}{0,0008\text{kg/ms}} = 10^5$$

Determinación del número de potencia

A través del número de Reynolds calculado en el apartado anterior y observando la gráfica de la figura 11.11, es posible determinar el número de potencia de agitación requerido.

Las diferentes curvas indican los diferentes valores del número de potencia en función del tipo de agitación que se lleva a cabo. En el caso de la empresa Resytech S.L se ha decidido utilizar agitadores de palas planas encastadas y, por lo tanto, hay que fijarse en la curva que hace referencia a este tipo de agitación.

Para valores elevados del número de potencia se observa que el número de Reynolds tiene un valor constante e igual a 5.

Cálculo de la potencia necesaria

Para determinar la potencia de agitación se utiliza la ecuación:

$$P = \frac{0,31^5 * 5 * 0,21^3 * 1212,04}{9,8 * 1000} = 16,4 * 10^{-6} \text{kw}$$

Por último, se calculan las revoluciones por minuto:

$$RPM = \frac{Vc * 60}{\pi * Da} = \frac{0,21\text{m/s} * 60\text{s}}{\pi * 0,31\text{m}} = 13 \text{rpm}$$

11.4. Reactores

En el presente apartado, se procede a diseñar los reactores que dan lugar a la formación de resina epoxi líquida en reaccionar bisfenol A con epiclorhidrina. En la planta diseñada por Resytech S.L son necesarios tres reactores para conseguir obtener resina epoxi líquida. Uno de ellos trabaja en continuo y, por lo tanto, se trata de un reactor continuo de taque agitado (RCTA), y los dos siguientes trabajan en discontinuo y son reactores discontinuos de tanque agitado (RDTA o batch). Se ha optado por diseñar dos reactores idénticos para utilizar uno como auxiliar.

La reacción en cuestión es exotérmica, es por este motivo que el reactor tiene que estar acompañado por un sistema de refrigeración que se observará posteriormente en su correspondiente diseño.

11.4.1. Diseño de los reactores R-200 Y R-201

Para saber el volumen de los reactores R-200 y R-201, en los cuales reaccionan bisfenol A y epiclorhidrina para dar lugar al producto intermedio, partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 5 m³/h.

A continuación, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr$$

Ecuación 11.15: Volumen de mezcla necesario.

Dónde:

- Q= caudal volumetrico de la mezcla (m³/h)
- Tr= tiempo de residencia en el mezclador (h)

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$V_{mezcla} = \frac{5,03 \text{ m}^3}{h} * 0,7 \text{ h} = 3,521 \text{ m}^3 = 3521 \text{ L}$$

En Resytech S.L se ha decidido diseñar dos reactores idénticos para utilizar uno como auxiliar.

Una vez calculado el volumen de cada reactor, por motivos de seguridad, ha de ser sobredimensionado para evitar vertidos del contenido y, por lo tanto, se multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2.

$$V_{reactor} = 1,2 * V_{mezcla} = 1,2 * 3,521 \text{ m}^3 = 4,225 \text{ m}^3 = 4225 \text{ L}$$

Ecuación 11.16: Volumen del reactor.

Una vez obtenido el valor del volumen del reactor, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

Sabiendo las siguientes relaciones:

- $H = 1,5 * D$
- $V = (\pi/4) * H * D^2 H = 1,5 * D$

Se realiza una combinación de ambas para obtener un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas, en las que el volumen del reactor es de $4,225 \text{ m}^3$.

De la combinación de las anteriores ecuaciones aislamos el valor del diámetro (D):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 4,225 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 1,53 \text{ m}$$

Ecuación 11.17: Diámetro.

Una vez obtenido el valor del diámetro, lo sustituimos en la ecuación para calcular la altura (H):

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 1,53 \text{ m} = 2,296 \text{ m}$$

Ecuación 11.18: Altura.

Igual que se ha sobredimensionado el reactor, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el reactor, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^\circ\text{C} = 150 + 15 = 165 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ecuación 11.19: Temperatura de diseño.

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del reactor. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,262 \text{ atm}) = 1,45 \text{ atm}$$

Ecuación 11.20: Presión de diseño.

- $P = \rho \cdot H \cdot g = 1179,8 \text{ kg/m}^3 \cdot 2,296 \text{ m} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 26546,44 \text{ kg/ms}^2 = 26546,44 \text{ Pa}$
- $P = 26546,44 \text{ Pa} \cdot \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,262 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este reactor está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Límite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Ecuación 11.21: Límite elástico.

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal tori esférico de Kloppe. Para obtener el factor M, se emplea la Tabla 1, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{1,377 \text{ m}}{0,117 \text{ m}} = 11,76$$

Ecuación 11.22: L/r.

Dónde:

- $L = 0,9 \cdot D = 0,9 \cdot 1,53 \text{ m} = 1,377 \text{ m}$
- $r = 0,085 \cdot L = 0,085 \cdot 1,377 \text{ m} = 0,117 \text{ m}$

Tabla 11.4. Relación entre factor M y coeficiente L/r.

M	1	1,03	1,06	1,08	1,1	1,13	1,15	1,17	1,18	1,2	1,22
L/r	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
M	1,25	1,28	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,46	1,48	1,5
L/r	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
M	1,52	1,54	1,56	1,58	1,6	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,77
L/r	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15	16	16,66

Una vez tenemos el valor del coeficiente L/r, interpolamos en la tabla anterior para obtener así el valor de M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3) \cdot G}{Sd \cdot E} + CA$$

Ecuación 11.23: Espesor de diseño.

Dónde:

- τd es el espesor de diseño (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- G es la gravedad específica de diseño del líquido
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- Sd es la tensión admisible en condiciones de diseño (MPa)

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior obtenemos:

$$\tau d = \frac{4,9 * 1,53 m * (2,296 m - 0,3) * \frac{1179,8 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,142 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del reactor es de 2,142 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

- $\tau_{\text{op lateral}} = \tau d + \tau_{\text{virola}} = 2,142 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,142 \text{ mm}$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

- $\tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{\text{op lateral}} = 1,5 * 7,142 \text{ mm} = 10,71 \text{ mm}$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del reactor (τt):

$$\tau t = \frac{4,9 * D * (H - 0,3)}{St * E} + CA$$

Ecuación 11.24: Espesor de la carcasa.

Dónde:

- τt es el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- St es la tensión admisible para la prueba hidráulica (MPa)

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior obtenemos:

$$\tau t = \frac{4,9 * 1,53 \text{ m} * (2,296 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,159 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesférico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador ($\tau_{op\text{cabezal}}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op\text{cabezal}} = \frac{P * R}{2 * S * E - 0,2 * P} + C1 + C2$$

Ecuación 11.25: Espesor de las partes superior e inferior del mezclador.

Donde:

- P es la presión de diseño (psi)
- R es el radio (pulgadas)
- S es la tensión admisible (psi)
- E es el factor de soldadura
- C1 es el sobre espesor de corrosión (mm) = 3 mm
- C2 es la tolerancia de fabricación (mm) = 2 mm

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior obtenemos:

$$\tau_{op\text{cabezal}} = \frac{21,315 \text{ psi} * 30,12 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 21,315 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5.005 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 1,45 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 21,315 \text{ psi}$$

$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{1,53 \text{ m}}{2} = 0,765 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 30,12 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{\text{cabezal}} = 1,5 * \tau_{\text{op}} = 1,5 * 5,005 \text{ mm} = 7,5075 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del reactor y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,71 mm
- Espesor cabezal = 7,5075 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,71 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del reactor:

$$D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} + 2 * \tau_{\text{lateral}} = 1,53 \text{ m} + 2 * 0,01071 \text{ m} = 1,551 \text{ m}$$

Ecuación 11.26: Diámetro exterior.

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la siguiente figura.

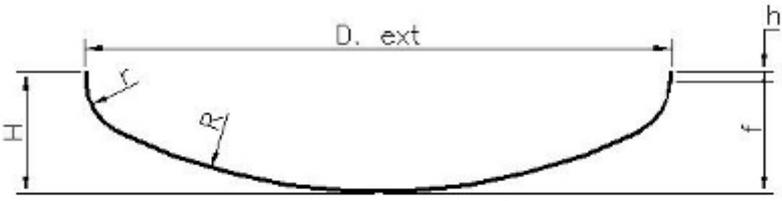
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	1551	
Espesor (mm)	10.71	
		
fondo Toriesferico Tipo KLOPPER		
Diametro disco (mm)	1791	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	1551	
r (mm)	155.10000000	
h (mm) >=	37.485	
f (mm)	295	
H (mm)	343	
V (sin h) (litros)	357.9	
Peso (h minima) (kg)	216	
HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.		

Figura 11.12: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En la figura anterior, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En ella, se deduce un volumen de 357,9 litros, o equivalentemente 0,3579 m³ del fondo del reactor.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del reactor:

$$V_{\text{tanque final}} = V_{\text{reactor}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 4,225 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,3579 \text{ m}^3 = 4,94 \text{ m}^3$$

Ecuación 11.27: Volumen total del tanque.

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{cili} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho = \frac{\pi}{4} * 2,296m * ((1,551m)^2 - (1,53m)^2) * \frac{8000kg}{m^3} = 933,39 kg$$

Ecuación 11.28: Masa de operación del cilindro.

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del reactor:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * ((1,551m)^3 - (1,53m)^3) * 8000kg/m^3 = 119,6 kg$$

Ecuación 11.29: masa de operación de los extremos superior e inferior.

Finalmente, se calcula la masa de operación del reactor entero:

$$M_{reactor} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 933,39 kg + 2 * 119,6 kg = 1172,6 kg$$

Ecuación 11.30: masa de operación del reactor.

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque. Al haber 4 tanques iguales, primeramente, hay que calcular la distancia entre los tanques:

$$Distància entre reactores = \frac{D_{ext}}{2} = \frac{1,551}{2} = 0,7755 m$$

Ecuación 11.31: Distancia entre reactores.

Por normativa, la distancia entre la distancia entre la pared del tanque y la cubeta (D_{pc}) ha de ser de 1 metro.

$$\text{Àrea ocupada} = \frac{\pi}{4} * N * D^2 = \frac{\pi}{4} * 2 * (1,551 m)^2 = 3,78 m^2$$

Ecuación 11.32: Área ocupada.

$$Longitud de la cubeta = N * D_{ext} + (N - 1) * D_{entre tanques} + 2 * D_{pc} =$$

$$2 * 1,551 + (2 - 1) * 0,7755 + 2 * 1 = 5,877$$

Ecuación 11.33: Longitud de la cubeta.

$$\text{Anchura de la cubeta} = D_{ext} + 2 * D_{pc} = 1,551 + 2 * 1 = 3,551 \text{ m}$$

Ecuación 11.34: Anchura de la cubeta.

$$\begin{aligned} \text{Área cubeta} &= \text{Longitud de la cubeta} * \text{Anchura de la cubeta} \\ &= 5,877 \text{ m} * 3,551 \text{ m} = 20,87 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Ecuación 11.35: Área cubeta

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 20,87 - 3,78 = 17,09 \text{ m}^2$$

Ecuación 11.36: Área libre.

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{\text{reactor}}}{\text{Área libre}} = \frac{4,225 \text{ m}^3}{17,09 \text{ m}^2} = 0,247 \text{ m}$$

Ecuación 11.37: Altura cubeta.

$$\begin{aligned} \text{Volumen cubeta} &= \text{Longitud} * \text{Amplitud} * \text{Altura} = 5,877 * 3,551 * 0,247 \\ &= 5,15 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Ecuación 11.38: Volumen cubeta.

Para diseñar correctamente los reactores, es necesario un buen diseño de la agitación, que permite homogenizar la mezcla para que se produzca la reacción de forma adecuada.

Para ello, es necesario partir de la suposición de que el diámetro del agitador equivale al 40% del diámetro total del reactor.

$$D_a = 0,4 * D = 0,4 * 1,53 \text{ m} = 0,612 \text{ m}$$

Ecuación 11.39: Diámetro agitador.

Por otro lado, también se ha determinado que la altura del agitador es igual al diámetro del reactor.

$$Ha = D = 1,53 \text{ m}$$

Ecuación 11.40: Altura del agitador.

A partir de estos valores y suponiendo que el Reynolds tiene un valor de 10^5 (régimen turbulento):

$$Re = \frac{\rho * N * Da^2}{\mu} = \frac{1182,5 \text{ kg/m}^3 * N * 0,612\text{m}^2}{0,00175 \text{ Pa/s}} = 10^5$$

Ecuación 11.41: Cálculo de la velocidad de agitación.

Aislando el parámetro N (velocidad de agitación expresada en revoluciones por segundo) de la ecuación x, se obtiene un valor de 0,24 rps. Este valor se ha sobredimensionado un 20% para poder asegurar la correcta homogeneización de la mezcla, dando como resultado un valor final de 0,29 rps.

El número de potencia (N_p) ha sido extraído de la gráfica que se muestra a continuación mediante el número de Reynolds y tiene un valor de 4.

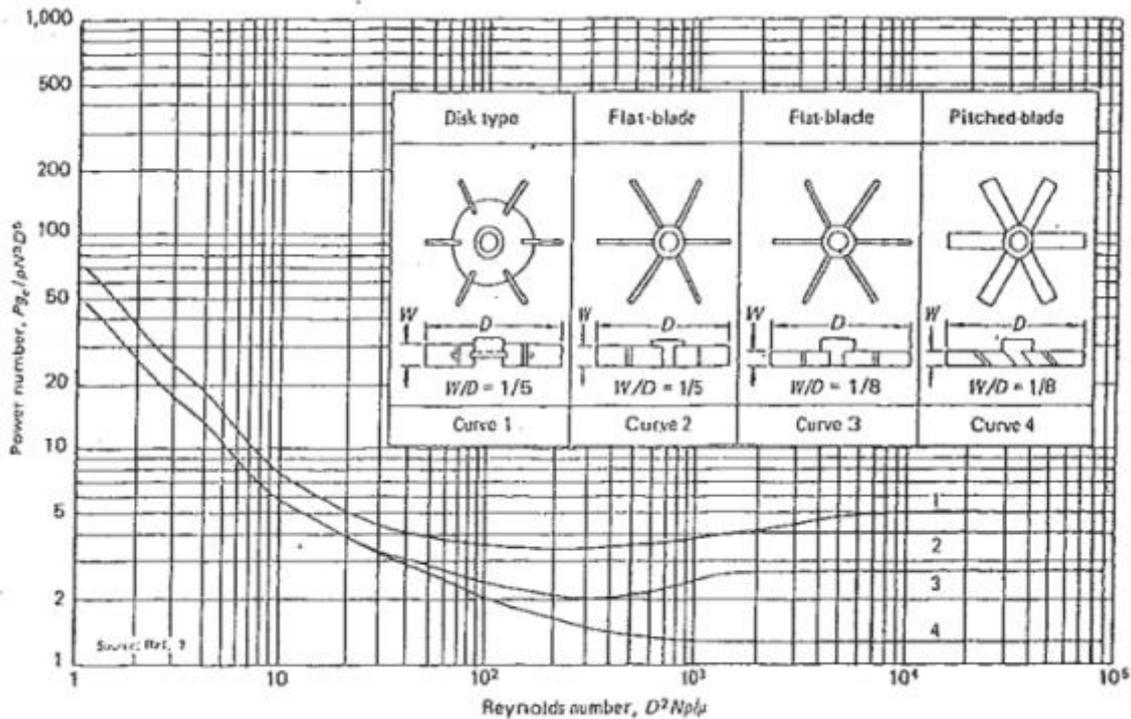


Figura 11.13: Número de potencia.

Para calcular la potencia del agitador se utiliza la siguiente fórmula:

$$P = Np * (\rho * N^3 * Da^5) = 4 * (1182,5 * 0,219^3 * 0,612^5) = 377,26 \text{ Watts}$$

Ecuación 11.42: Potencia del agitador.

A continuación, se calcula el radio de acción del agitador a través de la siguiente ecuación:

$$Ra = 9 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{P}{\mu}} = 9 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{377,26 \text{ Watts}}{0,00175 \text{ Pa} * s}} = 4,18 \text{ m}$$

Ecuación 11.43: Radio de acción del agitador.

El radio de acción calculado anteriormente equivale a 4,18 m. Es un valor más que aceptable ya que es mayor al radio del reactor, es decir, se producirá una mezcla completa de todo su volumen.

El caudal de descarga que puede tratar el agitador se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Q = N * Da^3 = 0,219 * 0,612^3 = 0,05 \frac{m^3}{s}$$

Ecuación 11.44: Caudal de descarga del agitador.

El tiempo de mezcla necesario para homogeneizar el volumen del reactor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$tm = \frac{Ntm * V}{N * Da^2} = \frac{40 * 4,225 m^3}{0,219 * 0,612^2} = 342,97 s = 5,71 min$$

Ecuación 11.45: Tiempo de mezcla.

Los parámetros calculados con anterioridad permiten diseñar un agitador de 6 placas planas verticales.

Finalmente, se muestra la siguiente tabla con todos los parámetros de diseño para el reactor. En este caso se utilizan dos reactores de iguales dimensiones y los siguientes parámetros indican el diseño del reactor.

Tabla 11.5. Parámetros de diseño del reactor

REACTOR 200/201	
Material	
TIPO	Acero inoxidable 316L
Densidad	8000 kg/m ³
Tensión máxima	580 N/mm ²
Factor de soldadura	0,8
Factor M	1,61
Tensión admisible de diseño	155 MPa
Tensión admisible prueba hidráulica	117 MPa

Condiciones de diseño	
Temperatura	165 °C
Presión	1,39 atm
Volumen requerido	
Número de tanques	1
Volumen necesario	3,521 m ³
Sobredimensionamiento	20%
Volumen final	4,225 m ³
Dimensiones del cuerpo cilíndrico	
Relación altura/diámetro	11,76
Altura	2,296 m
Diámetro interno	1,53 m
Diámetro externo	1,551 m
Radio interno	0,765 m
Radio externo	0,7755 m
Espesor	10,71 mm
Dimensiones fondo Klopper	
Altura del fondo	37,485 mm
Radio de la curvatura	1551 mm
Diámetro de la tapa	1791 mm
Volumen del cuerpo	357,9 L
Espesor	10,71 mm
Volumen del equipo	
Volumen del cabezal	0,3579 L
Volumen del cilindro	4,225 m ³

Volumen del equipo	4,94 m ³
Peso del equipo	
Peso del cuerpo cilíndrico	933,39 kg
Peso cabezal	119,6 kg
Peso del equipo	1172,6 kg
Distancia entre instalaciones	
Distancia entre reactores	0,7755 m
Distancia entre la pared del reactor y la cubeta	1 m
Dimensiones de la cubeta	
Área ocupada	3,78 m ²
Área libre	17,09 m ²
Longitud	5,877 m
Anchura	3,551 m
Altura	0,247 m
Volumen	5,15 m ³
Agitación	
Tipo de agitador	Turbina de 6 palas planas verticales
Potencia	377,26 watts
Caudal de descarga	0,05 m ³ /s
Radio de acción	4,18 m
Tiempo de mezcla	5,71 min

11.4.2. Diseño de reactores R-300 Y R-301

Para diseñar los reactores R-300 y R-301 se sigue el mismo procedimiento que para los reactores diseñados con anterioridad. A continuación, se pueden observar los cálculos de los diferentes parámetros necesarios:

Para saber el volumen de los reactores R-300 y R-301 partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 4,682 m³/h.

Posteriormente, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, que es de una hora, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr = \frac{4,682 \text{ m}^3}{h} * 1 h = 4,682 \text{ m}^3 = 4682 L$$

En Resytech S.L se ha decidido diseñar dos reactores idénticos para utilizar uno como auxiliar.

Una vez calculado el volumen de cada reactor, por motivos de seguridad, ha de ser sobredimensionado para evitar vertidos del contenido y, por lo tanto, se multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2.

$$V_{reactor} = 1,2 * V_{reactor} = 1,2 * 4,682 \text{ m}^3 = 5,618 \text{ m}^3 = 5618 L$$

Cuando se ha obtenido el valor del volumen del reactor, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

El diámetro es:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 5,618 \text{ m}^3}{1,5 * \pi}} = 1,683 \text{ m}$$

Y la altura:

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 1,683 \text{ m} = 2,525 \text{ m}$$

Igual que se ha sobredimensionado el reactor, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el reactor, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{\text{OPERACIÓN}} + 15^{\circ}\text{C} = 80 + 15 = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del reactor. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{\text{OPERACIÓN}} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,27 \text{ atm}) = 1,46 \text{ atm}$$

$$- P = \rho * H * g = 1108,07 \text{ kg/m}^3 * 2,525 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 27419,19 \text{ kg/ms}^2 = 27419,19 \text{ Pa}$$

$$- P = 27419,19 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,27 \text{ atm}$$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este reactor está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Límite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klopper. Para obtener el factor M, se emplea la Tabla 1, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{1,515 \text{ m}}{0,129 \text{ m}} = 11,76$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 1,683 \text{ m} = 1,515 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 1,515 \text{ m} = 0,129 \text{ m}$

Con el valor de L/r es posible determinar el valor de M a través de una interpolación sencilla. Este cálculo nos proporciona una $M= 1,61$. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$\tau d = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{Sd * E} + CA$$

Dónde:

- τd es el espesor de diseño (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)

- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- G es la gravedad específica de diseño del líquido
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- Sd es la tensión admisible en condiciones de diseño (MPa)

Sustituyendo los valores, obtenemos:

$$\tau d = \frac{4,9 * 1,683 m * (2,525 m - 0,3) * \frac{1108,07 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,164 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del reactor es de 2,164 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

- $\tau_{\text{lateral}} = \tau d + \tau_{\text{virola}} = 2,164 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,164 \text{ mm}$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

- $\tau_{\text{lateral}} = 1,5 * \tau_{\text{op lateral}} = 1,5 * 7,164 \text{ mm} = 10,746 \text{ mm}$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del reactor (τ):

$$\tau = \frac{4,9 * D * (H - 0,3)}{St * E} + CA$$

Dónde:

- τ es el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- St es la tensión admisible para la prueba hidráulica (MPa)

Sustituyendo los valores, obtenemos:

$$\tau t = \frac{4,9 * 1,683 \text{ m} * (2,525 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,196 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesférico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador ($\tau p_{cabezal}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau p_{cabezal} = \frac{P * R}{2 * S * E - 0,2 * P} + C1 + C2$$

Donde:

- P es la presión de diseño (psi)
- R es el radio (pulgadas)
- S es la tensión admisible (psi)
- E es el factor de soldadura
- C1 es el sobre espesor de corrosión (mm) = 3 mm
- C2 es la tolerancia de fabricación (mm) = 2 mm

Sustituyendo los valores en la ecuación, obtenemos:

$$\tau p_{cabezal} = \frac{21,462 \text{ psi} * 33,13 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 21,462 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5,005 \text{ mm}$$

$$\cdot P = 1,46 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 21,462 \text{ psi}$$

$$\cdot r = \frac{D}{2} = \frac{1,683 \text{ m}}{2} = 0,841 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 33,13 \text{ pulgadas}$$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{\text{cabezal}} = 1,5 * \tau_{\text{op}} = 1,5 * 5,005 \text{ mm} = 7,508 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del reactor y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,746 mm
- Espesor cabezal = 7,508 mm
-

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,746 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del reactor:

$$D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} + 2 * \tau_{\text{lateral}} = 1,683 \text{ m} + 2 * 0,010746 \text{ m} = 1,704 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Klopper y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la siguiente figura.

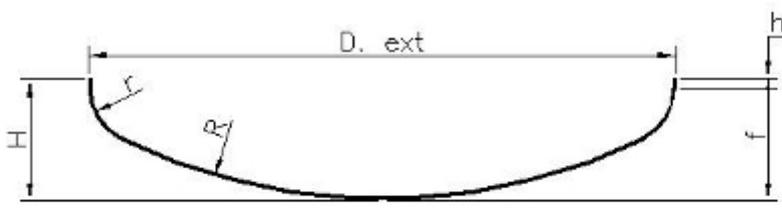
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="1683"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="10.746"/>	
 <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">fondo Toriesférico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="1937"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="1683"/>	
r (mm)	<input type="text" value="168.3"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="37.611000000"/>	
f (mm)	<input type="text" value="321"/>	
H (mm)	<input type="text" value="369"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="458.7"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="253"/>	
HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.		

Figura 11.14: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En ella, se deduce un volumen de 458,7 litros, o equivalentemente 0,4587 m³ del fondo del reactor.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del reactor:

$$V \text{ tanque final} = V_{\text{reactor}} + 2 \cdot V_{\text{cabezal}} = 5,618 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,4587 \text{ m}^3 = 6,53 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$M_{cili} = \frac{\pi}{4} * H * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho$$
$$= \frac{\pi}{4} * 2,525 \text{ m} * ((1,704\text{m})^2 - (1,683\text{m})^2) * \frac{8000\text{kg}}{\text{m}^3} = 1128,43 \text{ kg}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del reactor:

$$M_{cabezal} = 0,1 * (D_{ext}^3 - D_{int}^3) * \rho = 0,1 * ((1,704\text{m})^3 - (1,683\text{m})^3) * 8000\text{kg}/\text{m}^3$$
$$= 144,54 \text{ kg}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del reactor entero:

$$M_{reactor} = M_{cili} + 2 * M_{cabezal} = 1128,43 \text{ kg} + 2 * 144,54 \text{ kg} = 1417,52 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque. Al haber 2 tanques iguales, primeramente, hay que calcular la distancia entre los tanques:

$$\text{Distància entre tancs} = \frac{D_{ext}}{2} = \frac{1,704}{2} = 0,852 \text{ m}$$

Por normativa, la distancia entre la distancia entre la pared del tanque y la cubeta (D_{pc}) ha de ser de 1 metro.

$$\text{Àrea ocupada} = \frac{\pi}{4} * N * D^2 = \frac{\pi}{4} * 2 * (1,704 \text{ m})^2 = 4,61 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud de la cubeta} = N * D_{ext} + (N - 1) * D_{entre tanques} + 2 * D_{pc} =$$
$$2 * 1,704 + (2 - 1) * 0,852 + 2 * 1 = 6,26$$

$$\text{Anchura de la cubeta} = D_{ext} + 2 * D_{pc} = 1,704 + 2 * 1 = 3,704 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Área cubeta} &= \text{Longitud de la cubeta} * \text{Anchura de la cubeta} = 6,26\text{m} * 3,704\text{m} \\ &= 23,18 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 23,18 - 4,61 = 18,57 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{reactor}}{\text{Área libre}} = \frac{5,618 \text{ m}^3}{18,57 \text{ m}^2} = 0,3025 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen cubeta} &= \text{Longitud} * \text{Amplitud} * \text{Altura} = 6,26 * 3,704 * 0,3025 \\ &= 7,01 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para diseñar correctamente los reactores, es necesario un buen diseño de la agitación, que permite homogenizar la mezcla para que se produzca la reacción de forma adecuada.

Para ello, es necesario partir de la suposición de que el diámetro del agitador equivale al 40% del diámetro total del reactor.

$$D_a = 0,4 * D = 0,4 * 1,683 \text{ m} = 0,6732 \text{ m}$$

Por otro lado, también se ha determinado que la altura del agitador es igual al diámetro del reactor.

$$H_a = D = 1,683 \text{ m}$$

A partir de estos valores y suponiendo que el Reynolds tiene un valor de 10^5 (régimen turbulento):

$$Re = \frac{\rho * N * D_a^2}{\mu} = \frac{1176 \text{ kg/m}^3 * N * 0,673\text{m}^2}{0,00738 \text{ Pa/s}} = 10^5$$

Aislado el parámetro N (velocidad de agitación expresada en revoluciones por segundo) de la ecuación anterior, se obtiene un valor de 0,932 rps. Este valor se ha sobredimensionado un 20% para poder asegurar la correcta homogeneización de la mezcla, dando como resultado un valor final de 1,12 rps.

El número de potencia (Np) ha sido extraído gráficamente mediante el número de Reynolds y tiene un valor de 4.

Para calcular la potencia del agitador se utiliza la siguiente fórmula:

$$P = Np * (\rho * N^3 * Da^5) = 4 * (1176 * 1,12^3 * 0,673^5) = 912,42 \text{ Watts}$$

A continuación, se calcula el radio de acción del agitador a través de la siguiente ecuación:

$$Ra = 9 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{P}{\mu}} = 9 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{912,42 \text{ Watts}}{0,00738 \text{ Pa} * \text{s}}} = 3,16 \text{ m}$$

El radio de acción calculado anteriormente equivale a 3,16 m. Es un valor más que aceptable ya que es mayor al radio del reactor, es decir, se producirá una mezcla completa de todo su volumen.

El caudal de descarga que puede tratar el agitador se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Q = N * Da^3 = 1,12 * 0,673^3 = 0,34 \text{ m}^3/\text{s}$$

El tiempo de mezcla necesario para homogeneizar el volumen del reactor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$tm = \frac{Ntm * V}{N * Da^2} = \frac{40 * 5,616 \text{ m}^3}{1,12 * 0,34^2} = 1735,04 \text{ s} = 28,9 \text{ min}$$

Los parámetros calculados con anterioridad permiten diseñar un agitador de 6 placas planas verticales.

Finalmente, en la tabla que se muestra a continuación se observan todos los parámetros de diseño para el reactor. En este caso se utilizan 2 tanques de iguales dimensiones y los siguientes parámetros indican el diseño del reactor.

Tabla 11.6. *Parámetros de diseño del reactor.*

MEZCLADOR R-300/301	
Material	
TIPO	Acero inoxidable 316L
Densidad	8000 kg/m ³
Tensión máxima	580 N/mm ²
Factor de soldadura	0,8
Factor M	1,61
Tensión admisible de diseño	155 MPa
Tensión admisible prueba hidráulica	117 MPa
Condiciones de diseño	
Temperatura	95 °C
Presión	1,39 atm
Volumen requerido	
Número de tanques	2
Volumen necesario	4,682 m ³
Sobredimensionamiento	20%
Volumen final	5,618 m ³
Dimensiones del cuerpo cilíndrico	
Relación altura/diámetro	11,76

Altura	2,525 m
Diámetro interno	1,683 m
Diámetro externo	1,704 m
Radio interno	0,841 m
Radio externo	0,852 m
Espesor	10,746 mm
Dimensiones fondo Klopper	
Altura del fondo	37,61 mm
Radio de la curvatura	1683 mm
Diámetro de la tapa	1937 mm
Volumen del cuerpo	458,7 L
Espesor	10,746 mm
Volumen del equipo	
Volumen del cabezal	458,7 L
Volumen del cilindro	5,618 m ³
Volumen del equipo	6,53 m ³
Peso del equipo	
Peso del cuerpo cilíndrico	1128,43 kg
Peso cabezal	144,54 kg
Peso del equipo	1417,52 kg
Distancia entre instalaciones	
Distancia entre tanques	0,852 m
Distancia entre la pared del tanque y la cubeta	1 m
Dimensiones de la cubeta	

Área ocupada	4,61 m ²
Área libre	18,57 m ²
Longitud	6,26 m
Anchura	3,704 m
Altura	0,3025 m
Volumen	7,01 m ³
Agitación	
Tipo de agitador	Turbina de 6 palas planas verticales
Potencia	912,42 watts
Caudal de descarga	0,34 m ³ /s
Radio de acción	3,16 m
Tiempo de mezcla	28,9 min

11.4.3. Diseño del reactor R-500 y R-501

Para diseñar los reactores R-500 y R-501 se sigue el mismo procedimiento que para los reactores diseñados con anterioridad. A continuación, se pueden observar los cálculos de los diferentes parámetros necesarios:

Para saber el volumen de los reactores R-500 y R-501, en el cual se termina de reaccionar para producir una mayor cantidad de resina epoxi líquida, partimos del caudal total de entrada, que es la suma de los caudales parciales y equivale a 0,655 m³/h.

Posteriormente, a partir del caudal de entrada y del tiempo de residencia, se procede a calcular el volumen necesario de mezcla:

$$V_{mezcla} = Q * tr = \frac{0,655 \text{ m}^3}{h} * 0,5 \text{ h} = 0,328 \text{ m}^3 = 328 \text{ L}$$

En Resytech S.L se ha decidido diseñar dos reactores idénticos para utilizar uno como auxiliar.

Una vez calculado el volumen de cada reactor, por motivos de seguridad, ha de ser sobredimensionado para evitar vertidos del contenido y, por lo tanto, se multiplica este valor por el coeficiente de seguridad 1,2.

$$V_{reactor} = 1,2 * V_{mezcla} = 1,2 * 0,328 m^3 = 0,394 m^3 = 394L$$

Una vez obtenido el valor del volumen del reactor, que no será el volumen final, se pueden calcular sus dimensiones.

El diámetro del reactor es:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{1,5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,394 m^3}{1,5 * \pi}} = 0,694 m$$

Y la altura:

$$H = 1,5 * D = 1,5 * 0,694 m = 1,04 m$$

Igual que se ha sobredimensionado el reactor, por motivos de seguridad, también hay que hacerlo con los parámetros de temperatura y presión de su contenido.

Primeramente, calculamos la temperatura a la que debe resistir el reactor, que es la temperatura a la que se encontraría el contenido más un baremo de 15°C extra como parámetro de seguridad:

$$T = T_{OPERACIÓN} + 15^{\circ}C = 80 + 15 = 95 ^{\circ}C$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a calcular también la presión del reactor. Esta se calcula sumando la presión a la que se encuentra el contenido y el incremento de presión causado por la altura del mezclador. Una vez obtenido el valor de presión total, éste se multiplica por el coeficiente de seguridad 1,15:

$$P = 1,15 * (P_{OPERACIÓN} + \Delta P) = 1,15 * (1 \text{ atm} + 0,111 \text{ atm}) = 1,28 \text{ atm}$$

- $P = \rho * H * g = 1105,25 \text{ kg/m}^3 * 1,04 \text{ m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 11264,71 \text{ kg/ms}^2 = 11264,71 \text{ Pa}$
- $P = 11264,71 \text{ Pa} * \frac{\text{atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0,111 \text{ atm}$

Donde:

- ρ =densidad del fluido (kg/m^3)
- g =fuerza de la gravedad (m/s^2)
- h =altura de la columna de líquido (m)

Este reactor está construido a base de acero inoxidable. Por ello, se han determinado diferentes parámetros de este material:

Límite elástico:

Es la máxima tensión a la que se puede someter un material sin ser deformado permanentemente. Para el caso del acero inoxidable 316L es el siguiente:

$$S = 580 \text{ N/mm}^2 * \frac{9,87 \text{ atm}}{\text{N/mm}^2} = 5724,6 \text{ atm}$$

Factor de soldadura:

El factor de soldadura es el factor que asegura que no se dé ninguna deformación del material. Ya que, si se llega al límite elástico y este presenta algún tipo de error, el material quedará deformado. Para el acero inoxidable 316L es el siguiente: $E=0,8$.

Factor M:

El factor M cuantifica la relación entre los radios del cabezal toriesférico de Klopper. Para obtener el factor M, se emplea la Tabla 1, en la cual es necesario conocer el factor L/r para determinarlo mediante una interpolación lineal.

Por ello, primeramente, se calcula el factor L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{0,625 \text{ m}}{0,053 \text{ m}} = 11,79$$

Dónde:

- $L = 0,9 * D = 0,9 * 0,694 \text{ m} = 0,625 \text{ m}$
- $r = 0,085 * L = 0,085 * 0,625 \text{ m} = 0,053 \text{ m}$

Una vez calculado la relación L/r, se puede obtener el valor del factor M. Este cálculo nos proporciona una M= 1,61. Como es inferior al mínimo, se determinará una tolerancia de fabricación de 2mm (valor mínimo).

A continuación, se calcula el espesor de diseño del mezclador (τd):

$$d = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{Sd * E} + CA$$

Dónde:

- τd es el espesor de diseño (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- G es la gravedad específica de diseño del líquido
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- Sd es la tensión admisible en condiciones de diseño (MPa)

Sustituyendo los valores en la ecuación, obtenemos:

$$\tau d = \frac{4,9 * 0,694 \text{ m} * (1,04 \text{ m} - 0,3) * \frac{1105,25 \text{ kg/m}^3}{1000}}{155 * 0,8} + 2 \text{ mm} = 2,022 \text{ mm}$$

Como se ha calculado previamente, el espesor de diseño del reactor es de 2,022 mm. Cuando el espesor es inferior a 15mm, hay que sumarle el espesor de la chapa protectora que como mínimo es de 5 mm:

- $\tau_{op\ lateral} = \tau_d + \tau_{virola} = 2,022 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 7,022 \text{ mm}$

Y, por último, el espesor de operación se multiplica por el factor de seguridad 1,5:

- $\tau_{lateral} = 1,5 * \tau_{op\ lateral} = 1,5 * 7,022 \text{ mm} = 10,54 \text{ mm}$

Posteriormente, se calcula también el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica del reactor (τ_t):

$$\tau_t = \frac{4,9 * D * (H - 0,3)}{St * E} + CA$$

Dónde:

- τ_t es el espesor de la carcasa para la prueba hidráulica (mm)
- D es el diámetro interior del mezclador (m)
- E es el factor de soldadura (adimensional)
- H es el nivel de diseño del líquido (m)
- CA es la tolerancia a la corrosión (mm)
- St es la tensión admisible para la prueba hidráulica (MPa)

Sustituyendo los valores en la ecuación X obtenemos:

$$\tau_t = \frac{4,9 * 0,694 \text{ m} * (1,04 \text{ m} - 0,3)}{117 * 0,8} + 2\text{mm} = 2,027 \text{ mm}$$

El modelo que seguir para determinar los parámetros de los cabezales es el de Klopper, debido al fondo toriesférico del mezclador. Para calcular el espesor de las partes superior e inferior del mezclador ($\tau_{op\ cabezal}$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_{op\ cabezal} = \frac{P * R}{2 * S * E - 0,2 * P} + C1 + C2$$

Donde:

- P es la presión de diseño (psi)
- R es el radio (pulgadas)
- S es la tensión admisible (psi)
- E es el factor de soldadura
- C1 es el sobre espesor de corrosión (mm) = 3 mm
- C2 es la tolerancia de fabricación (mm) = 2 mm

Sustituyendo los valores en la ecuación, obtenemos:

$$\tau_{op\text{cabezal}} = \frac{18,82 \text{ psi} * 13,66 \text{ pulgadas}}{2 * 84122 \text{ psi} * 0,8 - 0,2 * 18,82 \text{ psi}} + 3 + 2 = 5.002 \text{ mm}$$

- $P = 1,28 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{\text{atm}} = 18,82 \text{ psi}$
- $r = \frac{D}{2} = \frac{0,694 \text{ m}}{2} = 0,347 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ pulgadas}}{\text{m}} = 13,66 \text{ pulgadas}$

Y, como para todos los parámetros anteriores, volvemos a multiplicar por el coeficiente de seguridad 1,5:

$$\tau_{\text{cabezal}} = 1,5 * \tau_{op\text{cabezal}} = 1,5 * 5,002 \text{ mm} = 7,503 \text{ mm}$$

Una vez tenemos calculados los espesores del lateral del reactor y de los cabezales superior e inferior, se escoge el valor del espesor mayor entre estos dos.

- Espesor lateral = 10,54 mm
- Espesor cabezal = 7,503 mm

Por lo tanto, el espesor escogido será el de 10,54 mm para todo el mezclador.

Seguidamente, para el diseño del cabezal tipo Klopper, es necesario conocer aparte del espesor ya calculado, el diámetro exterior del reactor:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * \tau_{lateral} = 0,694 \text{ m} + 2 * 0,01054 \text{ m} = 0,715 \text{ m}$$

Una vez se tienen esos dos parámetros, se introducen en la calculadora de fondos Kloppe y esta nos proporcionará sus dimensiones tal como muestra la siguiente figura.

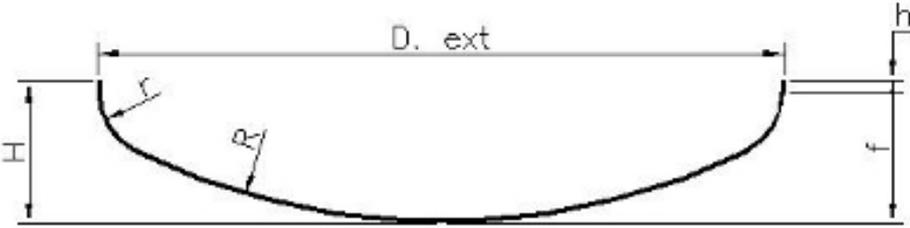
Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	<input type="text" value="715"/>	
Espesor (mm)	<input type="text" value="10.54"/>	
		
fondo Toriesferico Tipo KLOPPER		
Diametro disco (mm)	<input type="text" value="864"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	<input type="text" value="715"/>	
r (mm)	<input type="text" value="71.5"/>	
h (mm) >=	<input type="text" value="36.89"/>	
f (mm)	<input type="text" value="134"/>	
H (mm)	<input type="text" value="181"/>	
V (sin h) (litros)	<input type="text" value="33.4"/>	
Peso (h minima) (kg)	<input type="text" value="49"/>	

Figura 11.15: Calculadora de parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En la figura anterior, se han calculado los parámetros del fondo toriesférico tipo Kloppe.

En ella, se deduce un volumen de 33,4 litros, o equivalentemente 0,0334 m³ del fondo del reactor.

Ahora, se procede a calcular el volumen total del reactor:

$$V_{\text{reactor final}} = V_{\text{reactor}} + 2 * V_{\text{cabezal}} = 0,394 \text{ m}^3 + 2 * 0,0334 \text{ m}^3 = 0,461 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula la masa de operación del cilindro:

$$\begin{aligned} M_{\text{cili}} &= \frac{\pi}{4} * H * (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) * \rho \\ &= \frac{\pi}{4} * 1,04 \text{ m} * ((0,715\text{m})^2 - (0,694\text{m})^2) * \frac{8000\text{kg}}{\text{m}^3} = 193,35 \text{ kg} \end{aligned}$$

Y después la masa de operación de los extremos superior e inferior del reactor:

$$\begin{aligned} M_{\text{cabezal}} &= 0,1 * (D_{\text{ext}}^3 - D_{\text{int}}^3) * \rho = 0,1 * ((0,715\text{m})^3 - (0,694\text{m})^3) * 8000\text{kg}/\text{m}^3 \\ &= 25,02 \text{ kg} \end{aligned}$$

Finalmente, se calcula la masa de operación del reactor entero:

$$M_{\text{reactor}} = M_{\text{cili}} + 2 * M_{\text{cabezal}} = 193,35 \text{ kg} + 2 * 25,02 \text{ kg} = 243,39 \text{ kg}$$

Y, por último, se calculan los parámetros de diseño de la cubeta del tanque. Al haber 2 tanques iguales, primeramente, hay que calcular la distancia entre los tanques:

$$\text{Distancia entre reactores} = \frac{D_{\text{ext}}}{2} = \frac{0,715}{2} = 0,3575 \text{ m}$$

Por normativa, la distancia entre la pared del tanque y la cubeta (Dpc) ha de ser de 1 metro.

$$\text{Área ocupada} = \frac{\pi}{4} * N * D^2 = \frac{\pi}{4} * 2 * (0,715 \text{ m})^2 = 0,803 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud de la cubeta} &= N * D_{ext} + (N - 1) * D_{entre \ tanques} + 2 * D_{pc} = \\ &2 * 0,715 + (2 - 1) * 0,3575 + 2 * 1 = 3,79 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Anchura de la cubeta} = D_{ext} + 2 * D_{pc} = 0,715 + 2 * 1 = 2,715 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Área cubeta} &= \text{Longitud de la cubeta} * \text{Anchura de la cubeta} = 3,79 \text{ m} * \\ &2,715 \text{ m} = 10,29 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Área libre} = \text{Área cubeta} - \text{Área ocupada} = 10,29 \text{ m} - 0,803 \text{ m} = 9,487 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura cubeta} = \frac{V_{reactor}}{\text{Área libre}} = \frac{0,461 \text{ m}^2}{9,487 \text{ m}^2} = 0,049 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen cubeta} &= \text{Longitud} * \text{Amplitud} * \text{Altura} = 3,79 * 2,715 * 0,049 \\ &= 0,504 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para diseñar correctamente los reactores, es necesario un buen diseño de la agitación, que permite homogenizar la mezcla para que se produzca la reacción de forma adecuada.

Para ello, es necesario partir de la suposición de que el diámetro del agitador equivale al 40% del diámetro total del reactor.

$$D_a = 0,4 * D = 0,4 * 0,714 \text{ m} = 0,285 \text{ m}$$

Por otro lado, también se ha determinado que la altura del agitador es igual al diámetro del reactor.

$$Ha = D = 0,714 \text{ m}$$

A partir de estos valores y suponiendo que el Reynolds tiene un valor de 10^5 (régimen turbulento):

$$Re = \frac{\rho * N * Da^2}{\mu} = \frac{1014,7 \text{ kg/m}^3 * N * 0,285\text{m}^2}{0,13 \text{ Pa/s}} = 10^5$$

Aislado el parámetro N (velocidad de agitación expresada en revoluciones por segundo) de la ecuación anterior, se obtiene un valor de 4,49 rps. Este valor se ha sobredimensionado un 20% para poder asegurar la correcta homogeneización de la mezcla, dando como resultado un valor final de 5,394 rps.

El número de potencia (N_p) ha sido extraído gráficamente mediante el número de Reynolds y tiene un valor de 4.

Para calcular la potencia del agitador se utiliza la siguiente fórmula:

$$P = N_p * (\rho * N^3 * Da^5) = 4 * (1014,7 * 5,394^3 * 0,285^5) = 1197,72 \text{ Watts}$$

A continuación, se calcula el radio de acción del agitador a través de la siguiente ecuación:

$$Ra = 9 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{P}{\mu}} = 9 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{1197,72 \text{ Watts}}{0,13 \text{ Pa} * \text{s}}} = 0,86 \text{ m}$$

El radio de acción calculado anteriormente equivale a 0,86 m. Es un valor más que aceptable ya que es mayor al radio del reactor, es decir, se producirá una mezcla completa de todo su volumen.

El caudal de descarga que puede tratar el agitador se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Q = N * Da^3 = 5,394 * 0,285^3 = 0,125 \text{ m}^3/\text{s}$$

El tiempo de mezcla necesario para homogeneizar el volumen del reactor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$tm = \frac{Ntm * V}{N * Da^2} = \frac{40 * 0,394 \text{ m}^3}{5,394 * 0,285^2} = 35,97 \text{ s} = 0,6 \text{ min}$$

Los parámetros calculados con anterioridad permiten diseñar un agitador de 6 placas planas verticales.

Finalmente, en la tabla que se muestra a continuación se observan todos los parámetros de diseño para el reactor. En este caso se utilizan 2 tanques de iguales dimensiones y los siguientes parámetros indican el diseño del reactor.

Tabla 11.7. Parámetros de diseño del reactor.

REACTOR 500/501	
Material	
TIPO	Acero inoxidable 316L
Densidad	8000 kg/m ³
Tensión máxima	580 N/mm ²
Factor de soldadura	0,8
Factor M	1,61
Tensión admisible de diseño	155 MPa
Tensión admisible prueba hidráulica	117 MPa
Condiciones de diseño	
Temperatura	95 °C

Presión	1,28 atm
Volumen requerido	
Número de reactores	2
Volumen necesario	0,328 m ³
Sobredimensionamiento	20%
Volumen final	0,394 m ³
Dimensiones del cuerpo cilíndrico	
Relación altura/diámetro	11,79
Altura	1,04 m
Diámetro interno	0,694 m
Diámetro externo	0,715 m
Radio interno	0,347 m
Radio externo	0,3537 m
Espesor	10,54 mm
Dimensiones fondo Klopper	
Altura del fondo	181 mm
Radio de la curvatura	715 mm
Diámetro de la tapa	864 mm
Volumen del cuerpo	33,4 L
Espesor	10,54 mm
Volumen del equipo	
Volumen del cabezal	33,4 L
Volumen del cilindro	0,394 m ³
Volumen del equipo	0,461 m ³
Peso del equipo	

Peso del cuerpo cilíndrico	193,35 kg
Peso cabezal	25,02 kg
Peso del equipo	243,39 kg
Distancia entre instalaciones	
Distancia entre reactores	0,3575 m
Distancia entre la pared del reactor y la cubeta	1 m
Dimensiones de la cubeta	
Área ocupada	0,803 m ²
Área libre	9,487 m ²
Longitud	3,79 m
Anchura	2,715 m
Altura	0,049 m
Volumen	0,504 m ³
Agitación	
Tipo de agitador	Turbina de 6 palas planas verticales
Potencia	1197,72 watts
Caudal de descarga	0,125 m ³ /s
Radio de acción	0,86 m
Tiempo de mezcla	0,6 min

11.5. Diseño de refrigeración de Reactores

En ResyTech S.L. se utilizan intercambiadores de calor previos a los reactores con tal de condicionar el corriente de proceso a las temperaturas de operación de cada reactor y así evitar tener que aportar una gran cantidad de energía a los reactores. Pero esto no significa que estos no deban recibir algún aporte energético. Las propias reacciones que se llevan a cabo dentro de dichos reactores generan una liberación o adsorción del calor en el sistema, debiéndose instalar sistemas de refrigeración o calefactor en el equipo. Para conocer esta energía disipada o adsorbida por la reacción, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = [\Delta H_r + \Delta C_p(T - T_r)] * F_{ae} * X$$

Ecuación 11.46. Cálculo de la energía térmica de reacción

Donde;

- Q: Energía de reacción. (kJ/h)
- ΔH_r : Entalpia de reacción/formación. Se describe como el sumatorio de entalpias de formación de los productos menos el sumatorio de los reactivos. (kJ/kmol)
- ΔC_p : Diferencial de calor específico. Se describe como el sumatorio de los calores específicos de los productos menos el sumatorio de la de los reactivos. (kJ/kmol/K)
- T: Temperatura en el reactor. (°C)
- T_r : Temperatura de referencia a la que se obtienen los valores de C_p . (°C)
- F_{ae} : Flujo molar de entrada del reactivo principal de la reacción. (kmol/h)
- X: Grado de conversión de la reacción.

A continuación, se mostrarán los valores de calor específico de cada componente:

Tabla 11.8. Calores específicos

	C_p (J/g/°C)	C_p (kJ/kmol/°C)
H2O	4,186	75,41
NaCl	0,880	51,43
NaOH	4,046	161,83
Epi	1,422	131,56
LER	1,110	377,84
BPH	1,698	701,78
MIBK	2,197	220,00
Bisfenol (60°)	2,330	531,92
BTAC	1,243	230,74

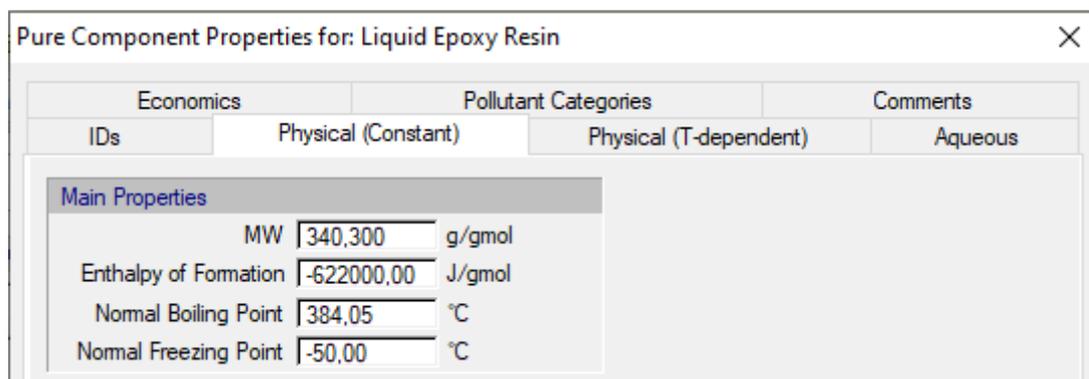
Todos los valores de calor específica expuestos en las tablas han sido obtenidos de la base de datos del programa de simulación de procesos *SuperPro*. Únicamente aquellos compuestos menos comunes que no se encontraban dentro de esta base de datos, como son la resina epoxi líquida (LER) y BPH se han obtenido a parte de correlaciones que el propio programa a efectuado al introducir alguno de las propiedades conocidas de estas sustancias.

De esta misma base de datos y correlaciones se han obtenido los valores de las entalpias de formación de cada compuesto. Con tal de poder verificar y dar fiabilidad a los valores obtenidos del programa *SuperPro*, se han contrastado todos los datos posibles en la página web oficial del Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías (NIST) específicamente en “el libro web de Química del NIST, SRD 69”. En la bibliografía se podrá encontrar el enlace de dicha web.

Tabla 11.9. Entalpias de formación

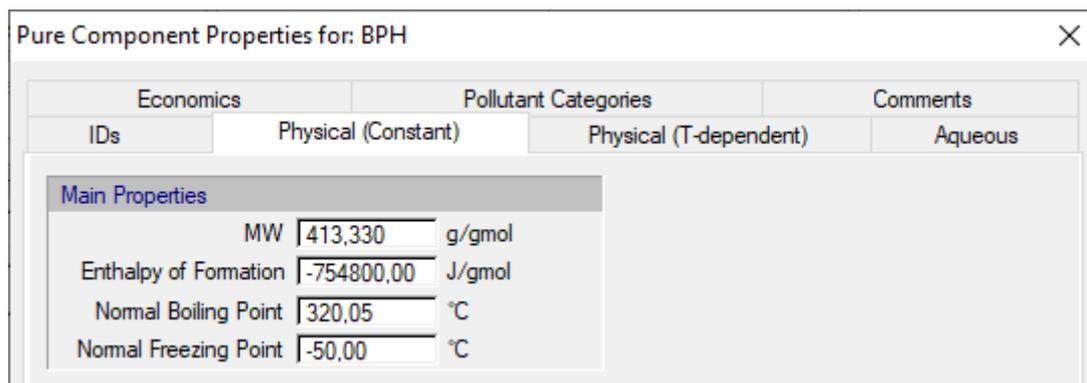
ΔH_f (kJ/kmol)			
Bisfenol A	-368600	LER	-622000
Epiclorhidrina	-149000	NaCl	-411120
		H2O	-285830
NaOH	-425930	B-PH	-754800

A continuación, se mostrarán algunos ejemplos de las propiedades de cada componente en *SuperPro*:



Economics		Pollutant Categories		Comments	
IDs	Physical (Constant)	Physical (T-dependent)	Aqueous		
Main Properties					
MW	340,300	g/gmol			
Enthalpy of Formation	-622000,00	J/gmol			
Normal Boiling Point	384,05	°C			
Normal Freezing Point	-50,00	°C			

Figura 11.16. Propiedades del LER en SuperPro



Pure Component Properties for: BPH

Economics		Pollutant Categories		Comments
IDs	Physical (Constant)	Physical (T-dependent)	Aqueous	
Main Properties				
MW	413,330	g/gmol		
Enthalpy of Formation	-754800,00	J/gmol		
Normal Boiling Point	320,05	°C		
Normal Freezing Point	-50,00	°C		

Figura 11.17. Propiedades BPH SuperPro

Una vez se obtienen todos estos valores, y conocidos los datos de especificaciones del corriente y temperatura objetivo en los reactores, se consiguen los siguientes valores energéticos de reacción en cada reactor:

Tabla 11.10. Valores de energía térmica por reacción en cada reactor

	R - 200	R - 300/301	R - 500/501
Conversión, X	0,982	0,95	0,99
T (°C) dentro reactor	150	80	80
F_{ae} (kmol/h)	5,20	5,11	0,26
F_{ie} (kmol/h)			
AH (kJ/kmol)	-88200	-409240	-409240
C_p			
AC_p	-93,259	-393,919	-393,919
Tr (°C)	25	25	25
Sumatorio			
Te (°C)	150	80	80
Q (kJ/h)	-4,90E+05	-2,09E+06	-1,03E+05
Q (kW)	-136,346	-581,086	-28,755

Como se puede apreciar en los valores de Q en la tabla, las reacciones que se llevan a cabo en el proceso de producción de resina epoxi líquida presentan un calor de reacción negativa, es decir, se trata de reacciones exotérmicas las cuales liberarán energía en forma de calor al sistema. En consecuencia, se añadirá un sistema de refrigeración para cada reactor con tal de poder mantener el sistema a la temperatura de operación y esta no sub aumentando así los peligros y disminuyendo la eficacia de cada etapa. En el reactor R-200 aun produciéndose una reacción exotérmica, se utiliza una temperatura de 150 °C ya que según se especifica en la patente de producción en la que se ha basado la línea de producción recomienda este valor para una alta conversión debido a que

eliminar parte del agua, la cual su presencia reduce la conversión, y epíclorhidrina en forma de vapor.

11.5.1. Diseño del sistema calefactor de R-200

Como se ha especificado anteriormente, en el reactor R-200 se produce una reacción exotérmica de -136,35 kW. Debemos adicionar un agente refrigerante que tenga menor energía térmica con tal de que absorba un valor igual al de la energía desprendida durante la reacción. Para ello se utilizará un corriente de agua que entrará a 20 °C. Por el tamaño del reactor, el cual esta especificado en el capítulo de equipos se decide poner un sistema de refrigeración de mediacaña envolviendo el reactor por el exterior.

Primeramente, se especifica el valor de energía intercambiada que es de mismo valor y signo contrario al liberado en la reacción, $Q_{\text{agua}} = 136,35 \text{ kW}$. Signo contrario ya que se especifica que este corriente debe captar parte de la energía térmica, acción endotérmica:

$$Q = m * Cp * \Delta T$$

Ecuación 11.47. Calor intercambiado

Para conocer el flujo másico de vapor necesario para obtener dicha aportación energética, se debe suponer una temperatura de salida. En este caso, se supone un valor de 40 °C en la salida de la mediacaña. Por tanto, conociendo el valor de calor específico del agua se obtiene un valor de flujo másico de:

$$m = \frac{136,35 \text{ kW}}{4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (40 - 20)^\circ\text{C}} = 1,629 \text{ kg/s}$$

Gracias al valor de la densidad del agua a dicha temperatura, 998 kg/m³, se necesita un corriente de 5,87 m³/h de vapor. A la hora de diseñar el tubo de mediacaña por donde pasará el agua, se debe diseñar de tal manera que la velocidad de paso de este cumpla con los valores típicos y permitidos para este tipo de fluido y operación. Este valor de velocidad típica se encuentra entre 1,5 y 2,5 m/s. En nuestro caso, se impondrá una velocidad de paso intermedia de 2 m/s. Mediante este valor se podrá obtener el área de paso por tubos con tal de obtener dicha velocidad:

$$\text{Área de paso, } A_p = \frac{m \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{v \text{ típica} \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right]} = \frac{5,87 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{7200 \frac{\text{m}}{\text{h}}} = 8,2 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2]$$

Ecuación 11.48. Cálculo del Área de paso

Mediante esta área de paso, con la siguiente ecuación se puede determinar el diámetro interior de la caña.

$$A_p = 2 * \pi * r^2 \rightarrow \text{Radio Mediacaña}, r = \sqrt{\frac{A_p}{2\pi}}$$

Ecuación 11.49. Cálculo del radio de la mediacaña

Se obtiene un radio de 0,011 m, diámetro de 0,023 m. Este radio hace referencia al radio interior de la mediacaña, paso por donde circula el agua. Se usará un grosor de tubería de 5 mm además de recubrir el exterior con una capa de *Foamglass (vidrio celular)* con tal de reducir al máximo las pérdidas de calor con el exterior. Con este grosor de tubería, se obtiene un diámetro externo de tubería de 32,79 mm el cual se aproximará a 33,0 mm. Para facilitar tanto la obtención de la tubería, así como reducir el coste de fabricación de este y conociendo la equivalencia de 25,4 mm es 1 pulgada, se busca la medida estandarizada más cercana al valor de la tubería. Esta sería una medida de 1 1/2".

Ahora que conocemos el área de paso necesario para que el corriente de agua circule a 2 m/s, buscaremos el área de contacto necesaria para refrigerar el reactor. Para ello, debemos calcular previamente el coeficiente global de transferencia U ;

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{H_2O}} + \frac{\Delta x_{tanque}}{k_{acero\ inoxidable}} + \frac{1}{h_{interior}} + R_{int} + R_{ext}$$

Ecuación 11.50. Coeficiente global de transferencia

Datos:

- $h_{\text{agua}} = 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
- Δx , grosor pared reactor= 10,71 mm
- Conductividad térmica del acero inoxidable, $k = 16,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
- Resistencia externa= 0,00009 $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
- Resistencia interna= 0,0007 $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$

Los valores de resistencia interna y externa se han extraído de la siguiente tabla:

Tabla 11.11. Valores de resistencia térmica

Valores de ensuciamiento	(m ² K/W)
Agua de mar T<50°C	0.00009
Vapores de alcohol	0.00009
Vapor de agua sin aceite	0.00009
Agua de caldera	0.0002
Líquido refrigerante	0.0002
Aire comprimido industrial	0.0004
Aceite de templar	0.0007
Fuel oil	0.0009
Agua de mar T>50°C	0.002

Se calculará el valor de h interna mediante la ecuación de Nusselt:

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,4}$$

Ecuación 11.51. Ecuación de Nusselt

Para el valor de Reynolds, se utiliza el valor especificado en el apartado de diseño del reactor R-200 donde se especifica dicho parámetro, $Re=1,00 \cdot 10^5$. Los siguientes valores de las propiedades del corriente interior se han extraído del apartado de diseño del intercambiador IC-200 que opera con la misma composición:

- Cp promedio= 1,607 kJ/kg/K
- $k_f= 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
- Viscosidad dinámica media, $\mu_d= 0,038 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- $Pr= 290,79$

Una vez obtenido todos estos valores, se procede a calcular el número de Nusselt obteniendo así un valor de $Nu=2,22 \cdot 10^3$. De tal manera, con dicho valor se puede calcular el coeficiente de transferencia interno como:

$$h_{c,int} = \frac{Nu * k_f}{D_{tanque,int}}$$

Ecuación 11.52. Coeficiente interno de transferencia de calor

Obteniendo un valor de $h_{c,int}$ de $305,27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Con todos estos valores, obtenemos un valor de **U global** de **$174,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$** .

Con dicho valor, podemos encontrar el área de contacto necesaria mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta T_{ml}$$

Ecuación 11.53. Calor térmico

Donde ΔT_{ml} es la temperatura media logarítmica, que tiene un valor de 119,72 °C, obteniendo así el valor del área de contacto necesario, valor de 6,52 m².

Una vez obtenido el área de intercambio necesario, y conociendo el diámetro de la mediacaña, solamente debemos sacar la longitud de tubo, el número de vueltas y la distancia entre tubos:

$$\text{Longitud área de contacto} = \frac{\text{Área de contacto}}{D_{\text{mediacaña}}}$$

Ecuación 11.54. Cálculo de la longitud de tubos

Se obtiene una longitud de 285,96 m de tubos, que se aproxima a 286,0 metros. Para ver las vueltas que debe dar alrededor del reactor, se debe identificar primero el perímetro de 1 vuelta alrededor del cuerpo cilíndrico del reactor:

$$\text{Longitud 1 vuelta al reactor} = 2 * \pi * r_{\text{reactor}} = 4,87 \text{ m}$$

Ecuación 11.55. Longitud de 1 vuelta alrededor del reactor

Con esta longitud, podemos dividir el valor de longitud de tubo entre la longitud de 1 vuelta con tal de conocer las vueltas totales:

$$N = \frac{\text{Longitud área de contacto}}{\text{Longitud 1 vuelta}} = 58,69 \text{ vueltas} \approx 59 \text{ vueltas}$$

Ecuación 11.56. Número de vueltas

Para finalizar el diseño de la mediacaña, debemos especificar la distancia entre tubos en la que se dispondrán alrededor del reactor mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Separación entre vueltas} = \frac{H_{\text{reactor}} - N * \Delta x}{N - 1}$$

Ecuación 11.57. Separación de tubos

Obteniendo así un valor redondeado de 35 mm de separación entre tubos.

11.5.2. Sistema refrigeración R-300/301

Para los reactores R-300/301 se aplicará el mismo sistema de refrigeración que en el caso del reactor 200, se seguirá exactamente la misma línea de cálculo con tal de diseñar el serpentín de mediacaña con paso de agua. Las únicas diferencias para destacar de este caso en comparación al anterior, es que en estos reactores ocurre una doble

reacción, donde primeramente reacciona el intermedio BPH con el hidróxido de sodio (NaOH) con tal de eliminar los cloros del intermedio, generando cloruro de sodio, y los terminales de este intermedio ionizado se combina con la epiclorhidrina sobrante para crear nuestro producto resina epoxi líquida. Todo este proceso de reacciones son reacciones exotérmicas:

Se debe refrigerar para mantener la temperatura

Fluido refrigerante: Agua

Sistema de refrigeración: Mediacaña

Q intercambiada vapor (kW)= 581,09

Te, agua (°C)= 20

Ts, agua (°C)= 45

ΔT (°C)= 25

T promedio (°C)= 32,5

cp vapor (kJ/kg/°C)= 4,186

$$Q = m * cp * \Delta T$$

m (kg/s)= 5,553

ρ vapor (kg/m³)= 998

m (m³/h)= 20,03

Para líquidos, la velocidad típica se encuentra entre los valores de 1,5-2,5 m/s. En nuestro caso se escogerá un valor promedio de 2 m/s.

v típica (m/s)= 2

v típica (m/h)= 7200

$$\text{Área de paso, } A_p = \frac{m \left[\frac{m^3}{h} \right]}{v \text{ típica} \left[\frac{m}{h} \right]} = [m^2]$$

Ap (m²)= 0,00278

$$p = 2 * \pi * r^2 \quad \rightarrow \text{Radio Media Caña, } r = \sqrt{\frac{A_p}{\pi * 2}}$$

R media caña (m)= 0,021

Diámetro media caña, Dint (m)= 0,042

Este radio hace referencia al radio interior de la media caña, paso por donde circula el vapor. Se usará un grosor de tubería de 5 mm con tal de reducir al máximo las pérdidas de calor hacia el exterior.

$$\text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} = 0,005$$

$$r_{\text{ext}} \text{ (m)} = 0,026$$

$$D_{\text{ext}} \text{ (mm)} = 52,083$$

Se busca una medida estandarizada lo más parecida al valor de diámetro de tubería.

$$1 \text{ pulgada } = 25,4 \text{ mm}$$

$$D_{\text{ext}} \text{ (pulgadas)} = 2,051$$

El diámetro nominal más cercano y superior al calculado es de:

$$2,25" = 2 \frac{1}{4}"$$

Conocemos el área de paso necesario para que el corriente de agua circule a 2 m/s. Ahora buscaremos el área de contacto necesario para refrigerar el reactor. Debemos calcular el coeficiente global de transferencia, U.

Datos reactor:

$$\frac{1}{h_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{\Delta x_{\text{tanque}}}{k_{\text{acero inoxidable}}} + \frac{1}{h_{\text{interior}}} + R_{\text{int}} + R_{\text{ext}}$$

Datos:

$$h_{\text{agua}} \text{ (W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C))} = 1000$$

$$\Delta x \text{ (m)} = 0,01071$$

k es la conductividad térmica

$$k_{\text{acero inoxidable}} \text{ (W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C))} = 16,3$$

$$R_{\text{ext}} \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W)} = 0,00009$$

$$R_{\text{int}} \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W)} = 0,0007$$

Calcularemos el valor de h interna mediante la ecuación de Nusselt.

$$Re = 1,00E+05$$

Valor de Re extraído del diseño del reactor.

Los siguientes valores de propiedades del corriente se han extraído del diseño del IC-201 que opera con la misma composición:

$$C_p \text{ prom (kJ/kg}^\circ\text{C)} = 1,527$$

$$k \text{ prom (W/(m} \cdot ^\circ\text{C))} = 0,21$$

$$\text{Viscosidad dinámica media, } \mu = 0,04 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$Pr = 290,857143$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

$$Nu = 2224,33$$

$$Nu = 2224,33$$

$$h_{c,int} = \frac{Nu \times K_f}{Dt, int}$$

$$D_{int \text{ tanque}} (m) = 1,683$$

$$h_{c,int} (W/(m^2 \cdot ^\circ C)) = 277,55$$

Entonces, con todos los valores obtenemos U global:

$$1/U = 6,05E-03$$

$$U (W/(m^2 \cdot ^\circ C)) = 165,3$$

Se puede encontrar el área de contacto necesario como:

$$Q = U * A * \Delta T_{ml}$$

$$\Delta T_{ml} = 117,06$$

$$A (m^2) = 30,03$$

Una vez obtenido el área de intercambio necesario, y conociendo el diámetro de la mediacaña, solamente debemos sacar su longitud, el número de vueltas y distancia entre tubos.

$$\text{Longitud area de contacto} = \frac{\text{Area de contact}}{D_{\text{media caña}}}$$

$$L \text{ área contacto (m)} = 713,67152$$

$$\text{Longitud 1 vuelta al reactor} = 2 * \pi * r_{\text{reactor}}$$

$$L \text{ 1 vuelta (m)} = 5,35327388$$

$$N = \frac{\text{Longitud area de contacto}}{\text{Longitud 1 vuelta}}$$

$$N = 133$$

$$\text{Separación entre vuelta} = \frac{H_{\text{reactor}} - N * \Delta x}{N - 1}$$

$$\text{Separación entre tubos (mm)} = 12$$

11.5.3. Sistema de refrigeración R-500/501

En el caso del sistema de refrigeración de los reactores 500 y 501, al tratarse de reactores de menor tamaño y volumen, se decide incorporar como sistema de refrigeración una camisa. Para ello, al producirse la misma reacción que en los reactores 300/301 pero a menor escala, se seguirá adicionando un corriente de agua como agente refrigerante.

El primer paso es calcular el corriente de refrigerante necesario para asimilar el calor intercambiado:

Se debe refrigerar para mantener la temperatura

Fluido refrigerante: Agua Sistema de refrigeración: Camisa

$$Q \text{ intercambiada (kW)} = 28,76$$

$$T_e, \text{ agua (}^\circ\text{C)} = 20$$

$$T_s, \text{ agua (}^\circ\text{C)} = 40$$

$$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)} = 20$$

$$T \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 30$$

$$c_p \text{ vapor (kJ/kg/}^\circ\text{C)} = 4,186$$

$$Q = m * c_p * \Delta T$$

$$m \text{ (kg/s)} = 0,343$$

$$\rho \text{ agua (kg/m}^3\text{)} = 998$$

$$m \text{ (m}^3\text{/h)} = 1,24$$

Una vez se identifica el corriente de agua, se debe especificar le velocidad a la que circulará el refrigerante. Este al ser un líquido, se encuentra en un rango de 1,5-2,5 m/s. En nuestro caso se escogerá un valor promedio de 2 m/s. De esta manera, al igual que en el diseño de los otros reactores, se calculará el área de paso:

$$v \text{ típica (m/s)} = 2$$

$$v \text{ típica (m/h)} = 7200$$

$$\text{Área de paso, } A_p = \frac{m \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{v \text{ típica} \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right]} = [\text{m}^2]$$

El área de paso obtenido es de $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Ahora que conocemos el área de paso necesario para que el corriente de agua circule a 2 m/s, buscaremos el área de contacto necesaria para refrigerar el reactor. Para ello, debemos calcular previamente el coeficiente global de transferencia U ;

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{H_2O}} + \frac{\Delta x_{tanque}}{k_{acero\ inoxidable}} + \frac{1}{h_{interior}} + R_{int} + R_{ext}$$

Ecuación 11.58. Coeficiente global de transferencia

Datos:

- h agua= 1000 W/(m²·°C)
- Δx, grosor pared reactor= 10,54 mm
- Conductividad térmica del acero inoxidable, k= 16,3 W/(m²·°C)
- Resistencia externa= 0,00009 m²·°C/W
- Resistencia interna= 0,0007 m²·°C/W

Los valores de resistencia interna y externa se han extraído de la siguiente tabla:

Tabla 11.12. Valores de resistencia térmica

Valores de ensuciamiento	(m ² K/W)
Agua de mar T<50°C	0.00009
Vapores de alcohol	0.00009
Vapor de agua sin aceite	0.00009
Agua de caldera	0.0002
Líquido refrigerante	0.0002
Aire comprimido industrial	0.0004
Aceite de templar	0.0007
Fuel oil	0.0009
Agua de mar T>50°C	0.002

Se calculará el valor de h interna mediante la ecuación de Nusselt:

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,4}$$

Ecuación 11.59. Ecuación de Nusselt

Para el valor de Reynolds, se utiliza el valor especificado en el apartado de diseño de los reactores 500/501 donde se especifica dicho parámetro, Re=1,00·10⁵. Los siguientes valores de las propiedades del corriente interior se han extraído del apartado de diseño del intercambiador IC-500 que opera con la misma composición:

- Cp promedio= 2,091 kJ/kg/K
- kf= 0,38 W/(m²·°C)
- Viscosidad dinámica media, μd= 0,038 Pa·s
- Pr= 209,1

Una vez obtenido todos estos valores, se procede a calcular el número de Nusselt obteniendo así un valor de $Nu=1,95 \cdot 10^3$. De tal manera, con dicho valor e puede calcular el coeficiente de transferencia interno como:

$$h_{c,int} = \frac{Nu * k_f}{D_{tanque,int}}$$

Ecuación 11.60. Coeficiente interno de transferencia de calor

Obteniendo un valor de $h_{c,int}$ de $1,07 \cdot 10^3$ W/(m²·°C). Con todos estos valores, obtenemos un valor de **U global** de **296,4 W/(m²·°C)**.

Con dicho valor, podemos encontrar el área de contacto necesaria mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta T_{ml}$$

Ecuación 11.61. Calor intercambiado

Donde ΔT_{ml} es la temperatura media logarítmica, que tiene un valor de 49,33 °C, obteniendo así el valor del área de contacto necesario, valor de 1,97 m². Para poder conocer la altura de la camisa desde el fondo del reactor, se debe calcular primeramente el área de contacto del fondo klopper, y una vez se obtenga este, se le resta al área total necesaria quedando únicamente el valor del área faltante, que se calculará como el área exterior del cilindro. A continuación, se mostrarán todos estos pasos seguidos:

Área de contacto exterior del fondo de Klopper:

$$A_{\text{fondo klopper}} (m^2) = 0,17$$

$$\text{Área faltante} = A - A_{\text{f Klopper}}$$

$$\text{Área faltante} (m^2) = 1,80$$

$$D_{\text{ext tanque}} (m) = 0,715$$

$$A_{\text{faltante}} = 2 * \pi * D_{\text{ext}} * H_{\text{camisa}}$$

Se puede calcular la altura de la camisa como;

$$H (m) = 0,400$$

Pero esta altura solo es la altura del lateral, la altura completa será sumando la mitad del perímetro total del fondo klopper:

$$H_{\text{camisa total}} = H + \frac{\text{Perímetro klopper}}{2} = 0,485 \text{ m}$$

Ecuación 11.62. Altura total de la camisa

Una vez obtenida dicha altura, y conociendo el área de paso de agua por camisa con tal de obtener una velocidad de flujo de 2 m/s, se puede calcular la distancia entre la pared del reactor y la camisa. Supondremos el área de paso de la camisa como un rectángulo el cual se curva cuando se acerca a la tapa klopper inferior;

$$A_{paso} = \Delta x_{reactor-camisa} * H_{camisa\ total} \rightarrow \Delta x = 0,355\ mm$$

Ecuación 11.63. Área de paso para camisa

Al obtenerse un valor tan pequeño de grosor entre la camisa y la pared del reactor, se utilizará el valor mínimo de espacio, siendo que $\Delta x=1,5\ mm$. Se supondrá un grosor de la pared de la camisa de 10 mm con tal aislar su interior del exterior.

11.6. Diseño de intercambiadores

En ResyTech S.L. se emplea el uso de intercambiadores de calor previos a los mezcladores y/o reactores con tal de reducir el gasto energético necesario para llevar el corriente de producción a la temperatura de operación. Debido a que el tamaño de estos es menor a los tanques y que están expresamente diseñados para la tarea de la transferencia de calor entre diferentes corrientes, reduce el área de intercambio con el exterior y facilita el proceso. Estos equipos son tanto para calentar como enfriar, dependiendo que se necesite en ese momento. También se encontrarán en la salida de los reactores con tal de enfriar el corriente y prepararlo para los equipos de separación de componentes.

11.6.1. Calculo para el diseño de intercambiadores

Antes de empezar a diseñar los intercambiadores, se deben identificar los corrientes del proceso que precisan de una operación de enfriamiento o calentamiento, así como la composición de este, la temperatura a la que se quiere llegar y las propiedades físicas de los componentes que lo componen como puede ser la capacidad calorífica específica entre otros. El número de intercambiadores que se instalarán en la planta, así como su finalidad y corrientes que procesan se pueden encontrar en el apartado de *Equipos*, específicamente en *2.3.3 Intercambiadores en ResyTech S.L.*

Inicialmente se busca el valor energético de calor que se debe generar para incrementar o disminuir la temperatura del corriente desde la temperatura inicial con la que entra al intercambiador hasta la temperatura deseada que queremos alcanzar. Por ello se hace uso de la siguiente formula de calor:

$$Q = F_{ae} * \sum \left[\frac{F_{ie}}{F_{ae}} * C_{pi} * (T - T_e) \right]$$

Ecuación 11.64. Cálculo del intercambio de calor necesario para variar la temperatura de un corriente

Donde;

- Q (kJ/h): Valor energético de calor necesario de intercambio.
- F_{ae} (kmol/h): flujo molar de entrada del componente mayoritario del corriente a tratar.
- F_{ie} (kmol/h): flujo molar de entrada de cada componente que compone el corriente.
- C_{pi} (J/g/°C): Capacidad calorífica específica de cada componente presente en el corriente.
- T (°C): Valor de temperatura que se desea alcanzar.
- T_e (°C): Temperatura de entrada.

Como se puede apreciar en la ecuación 11.64, el diferencial de temperatura entre la deseada y la de entrada es particular para cada componente. Pero en todos los casos de uso de intercambiadores que se llevarán a cabo en el proceso de ResyTech, los componentes que conforman el corriente a tratar en el intercambiador entran a la misma temperatura, es decir, que la temperatura de entrada es igual para todos los componentes igual que será la misma para la salida.

Se puede apreciar que según las unidades, la ecuación 11.64. quedaría de la siguiente manera:

$$Q = \frac{kg}{h} * \sum \frac{\frac{kg}{h}}{\frac{kg}{h}} * \frac{J}{g \cdot ^\circ C} \cdot ^\circ C = \frac{kg}{h} * \frac{J}{g} = \frac{kg * J}{h * g} * \frac{kJ}{1000J} * \frac{1000g}{kg} = \frac{kJ}{h}$$

Ecuación 11.65. Unidades Ecuación 11.64

De tal manera es como se explica que directamente podemos utilizar el valor de la capacidad calorífica específica en gramos, aunque multiplique por un factor en kg. Debido a que estos se compensan en su conversión con la conversión de Jules a kilo-Jules.

Pero esto no es todo, debido a que nosotros necesitamos una potencia calorífica en vez de energética, ya que de esta manera es como se diseñan y distribuyen los intercambiadores en el mercado industrial. Por ello, debemos convertir los kJ/h a kW.

$$Q \text{ (kW)} = \frac{kJ}{h} * 0.000278$$

Ecuación 11.66. Conversión de kJ/h a kW

A continuación, se mostrará una tabla con los cálculos energéticos y de potencia térmica necesaria para cada uno de los intercambiadores.

Tabla 11.13. Valores de necesidad calorífica para cada intercambiador

	IC-200	IC-201	IC-300	IC-301	IC - 500	IC-602-2	IC-602-1
T (°C) salida	150	80	25	25	80	35	35
Fae (kmol/h)	4.738,60	3.793,77	2207,67	1651,21	1651,21	1.735,51	219,59
Sumatorio	2,01	2,39	4,30	2,26	1,85	1,11	2,21
Te (°C)	25	150	80	80	25	330,4	114
Q (kJ/h)	1188011,59	-635496,87	-522160,88	-205481,52	251944,12	-665385,41	-38297,73
Q (kW)	330,030	-176,668	-145,160	-122,042	146,197	-186,30	-106,467

En la tabla 11.13. se pueden apreciar valores de Q negativas y positivas, haciendo referencia a la cantidad de energía que se desprende o capta el fluido respectivamente para llevar a cabo el cambio de temperatura. Es decir, un ejemplo sería el intercambiador 200 (IC-200), el cual debe absorber una energía de $11.88 \cdot 10^5$ kJ/h con tal de poder efectuar el salto térmico aumentando de 25°C a 150°C. Por tanto, lo que se buscará es la aportación de esta energía térmica mediante un fluido que transporte un valor energético térmico mayor, mayor temperatura, con tal de que este debido a la diferencia de temperaturas y desequilibrio, por la *Ley 0 de la Termodinámica*, el sistema busque el equilibrio térmico entre ambos fluidos, traspasando esta energía del fluido más caliente al más frío. Es el mismo caso para los intercambiadores donde el valor energético necesario sea negativo, que son los casos donde la temperatura deseada/salida es menor a la de entrada, por lo que para bajar su temperatura deberán desprenderse de la energía que llevan, por ello el valor negativo que representa un efecto “*exotérmico*”.

Una vez calculado la potencia necesaria que deberá tener nuestro intercambiador, antes de comenzar el diseño se debe dimensionar el intercambiador con tal que cumpla las especificaciones. Para el dimensionamiento de cada intercambiador se han escogido diferentes intercambiadores ya existentes en el mercado con tal de servir de guía. Se han utilizado los intercambiadores que ofrecen la empresa Proincar S.L. (Proyectos Industriales Carmona) como modelos en su página web. Además, muestran intercambiadores personalizados para diferentes empresas los cuales cumplen unos

requisitos específicos. Se podrá encontrar el enlace de dicha web en el apartado bibliográfico.

Todos los intercambiadores que se diseñarán serán de tubos y carcasas, los cuales facilitan los cálculos para dimensionarlos debido a su sencillez estructural, a más de que presentan un alto rendimiento y fácil mantenimiento. Por ello, el proceso de diseño y calculo de los intercambiadores seguirán la misma metodología para cada uno, la única diferencia serán los corrientes de refrigerante, el cual dependiendo de las necesidades de refrigeración o aportación de calor se utilizará uno u otro, y por consiguiente las propiedades de dichos componentes como puede ser el calor específico, densidades y conductividad térmica. Así como parámetros del mismo intercambiador como longitud, diámetros de tubos y número de tubos.

11.6.2. Diseño IC-200

A continuación, se mostrarán los cálculos para el diseño del intercambiador 200. Remarcar que la metodología utilizada para el diseño de dicho intercambiador es igual para el resto, únicamente cambian factores de las ecuaciones que dependiendo del tipo de refrigerante utilizado o composición del corriente a tratar variarán su valor. Por el resto, toda la línea de cálculos y ecuaciones utilizadas es la misma.

Una vez obtenido el valor de Q necesario, vemos que es un valor positivo. Esto significa un comportamiento *endotérmico* por parte del corriente a tratar, refiriéndose a la absorción de energía con tal de aumentar la energía contenida en forma de un aumento de temperatura en el corriente. Por tanto, esto significa que se debe aportar un corriente con mayor energía térmica que se traduce a un corriente con mayor temperatura. Para ello se utilizará un corriente de vapor de agua a 170 °C.

Una vez conocido los valores máximos de temperatura que deberá soportar el intercambiador, se escoge un modelo el cual sirva de base para el dimensionamiento del equipo para nuestro caso concreto. El modelo escogido es el Intercambiador 6E-121. Dicho intercambiador presenta los siguientes parámetros:

Tabla 11.14. Parámetros intercambiador modelo 6E-121

Intercambiador 6E-121		
Tipo de intercambiador	Tubo-Placa	
Disposición	Horizontal	
Datos de diseño		
	Carcasa	Tubos
Presión de diseño	8 Kg/cm ²	20 Kg/cm ²

Temperatura de diseño	194 °C	190 °C
Longitud Carcasa	4,5 m	
Altura carcasa (espesor)	0,5 m (4mm)	
Nº Tubos	544	
Diámetro tubos	¾" BWG16	
Longitud tubos	4,028 m	
Material	SA-213 TP316L	

Ya tenemos las medidas en las que basaremos nuestro intercambiador. Únicamente obviaremos la longitud de los tubos ya que este será uno de los parámetros característicos de nuestro sistema.

Como consideraciones iniciales se toman:

- Tipo intercambiador: carcasa y tubos
- Potencia calorífica: 330.03 KW
- El corriente a tratar circulará por la carcasa debido a su mayor alta viscosidad, con un flujo de 4.738,60 Kg/h. Compuesto por Epiclorhidrina y Bisfenol-A
- ΔT del corriente objetivo: de 25°C a 150°C
- Fluido refrigerante/calorífico: Vapor de agua a 170°C

Cálculos para el diseño del intercambiador

El primer paso es encontrar el flujo de fluido calorífico, en este caso vapor, que se necesita para aportar la energía necesaria para la operación. Para esto, se elige arbitrariamente un valor de salida del vapor, definiendo así el salto térmico que sufrirá dicho corriente. El valor supuesto es 115°C, ΔT de -55°C.

Una vez definido, se busca el corriente de vapor necesario mediante la siguiente ecuación:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Ecuación 11.67. Calor intercambiado

Donde Q es el calor intercambiado y/o calor que aporta el corriente de vapor, C_p es el calor específico, m el flujo másico y ΔT el salto térmico.

Se conoce el intercambio calorífico necesario, $Q=330.03KW$, además del salto térmico y el calor específico del vapor 2.01 KJ/kg/°C. Por tanto, la única incógnita aquí es el corriente m:

$$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} \quad \text{o} \quad \frac{(m * C_p)_{caliente}}{(m * C_p)_{frio}} = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_C}$$

Ecuación 11.68. Cálculo flujo másico refrigerante/calorífico

En ambas ecuaciones para encontrar el flujo másico de fluido calorífico se basa en la suposición/condición del intercambio energético total entre fluidos, es decir, intercambiadores totalmente adiabáticos que impiden el escape de este calor por la carcasa por lo que la única transferencia de calor se da entre el fluido que circula por tubos y el corriente que circula por la carcasa. Por ello se pueden igualar las Q de ambos fluidos ya que no hay intercambio con ningún otro sistema. Siendo así que toda la energía liberada por uno es captada por el otro.

$$m_{vapor} = \frac{-330.03 \text{ kW}}{2.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} \cdot (115 - 170)^\circ\text{C} = 18.469 \text{ kg/s}$$

Ecuación 11.69. Flujo másico vapor IC-200

El valor de Q utilizado esta vez es negativo, ya que hace referencia a la energía que debe liberar el corriente de vapor para que lo capte el corriente de proceso. Si actuará como refrigerante, el valor de Q por parte del proceso sería negativo (refiriéndose a la liberación de calor) y el valor de Q para el calculo de refrigerante sería positivo (absorción de calor).

El flujo másico necesario de vapor que debe recorrer por los tubos del intercambiador es de 2,985 kg/s, que equivale a 10747,23 kg/h. Pero esto es el corriente que circula por la totalidad de todos los tubos, el flujo por tubo es m/N , donde N es el número de tubos. Por tanto, siendo 544 el número de tubos, queda un flujo repartido de 0.138 kg/s. Este será el nuevo valor de m que se utilizará en los siguientes cálculos.

Para calcular la velocidad del fluido por tubos, debemos conocer el área/superficie de paso por tubo. Para ello necesitamos el diámetro interior del tubo. Para conocer dicho valor se debe obtener mediante una función que relaciona el diámetro exterior del tubo y el grosor de este, aunque el diámetro exterior del modelo de venta sea $\frac{3}{4}$ ", 19.05mm, en este caso se ha escogido un valor de 15.0mm ya que es el valor que por iteración nos cumple con una velocidad de paso de vapor dentro de los rangos expuestos más adelante. Conocemos el diámetro externo además del grosor del tubo BWG16. El sistema Brimingham Wire Gauge (BWG) es una norma empleada para especificar el grosor de alambres y tubos. BWG 16 equivale a 1.651mm. Por tanto, obtenemos:

$$D_{int,tubos} = D_{ext,tubos} - 2 * \Delta x, \text{ donde } \Delta x \text{ es el grosor}$$

Ecuación 11.70. Cálculo del diámetro interior de un tubo

$$D_{int,t} = 0.015m - 2 * 0.001651m = 0.011698m = 11.70mm$$

Una vez conocido este valor, se procede a calcular la velocidad del fluido por tubos. Según expone la *Guía de Referencia Técnica de SpiraxSarco*; “Para tuberías de distribución de vapor, la experiencia demuestra que son razonables las velocidades entre 25 - 40 m/s, pero deben considerarse como el máximo sobre la cual aparecen el ruido y la erosión, particularmente si el vapor es húmedo.” Por ello es importante ver si los valores supuestos para el salto de temperatura del vapor y los diámetros de tubería escogidos son válidos, conociendo la velocidad de circulación de nuestro sistema de vapor y si este entra dentro del rango. Aunque según la misma fuente, es aconsejable mantenerse en los 25 m/s para corrientes saturados húmedos.

Se utilizará la siguiente ecuación extraída de TLV, compañía especializada en vapor, donde nos presenta la siguiente fórmula para el cálculo de la velocidad de flujo:

$$v = \frac{m * V_e}{\pi \left(\frac{d_{int}}{2}\right)^2}, \text{ donde } V_e \text{ es el Volumen específico } \left(\frac{m^3}{kg}\right)$$

Ecuación 11.71. Velocidad de paso por tubos

Para el valor de volumen específico, este variará dependiendo de la temperatura, por ello se busca el volumen específico del vapor a la temperatura promedio entre la entrada de este y su salida, 170°C a 115°C respectivamente, dando así un valor de 142,5°C. Según se expone en la siguiente tabla de propiedades del vapor de agua, el volumen específico a dicha temperatura es de $V_e=0,490 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Tabla 11.15. Propiedades del vapor de agua

Temp. °C	Presión absoluta bar	Entalpia específica kWh/kg	Densidad kg/m³	Volumen específico m³/kg	Viscosidad dinámica cP	Viscosidad cinemática cSt	Calor específico kWh/kg·K
137	3,32	0,758202	1,814673	0,551064	0,013543	7,463072	0,0006354
138	3,42	0,758567	1,864195	0,536425	0,013578	7,283346	0,0006376
139	3,51	0,758930	1,914796	0,522249	0,013612	7,108911	0,0006397
140	3,62	0,759290	1,966494	0,508519	0,013647	6,939586	0,0006419
141	3,72	0,759648	2,019307	0,495220	0,013681	6,775194	0,0006441
142	3,82	0,760003	2,073251	0,482334	0,013716	6,615567	0,0006464
143	3,93	0,760356	2,128345	0,469849	0,013750	6,460542	0,0006487

Una vez obtenido tal valor, se calcula:

$$v_{vapor} = \frac{0.00549 \frac{kg}{s} * 0.490 m^3/kg}{\pi \left(\frac{0.0117m}{2}\right)^2} = 25.02 m/s$$

Obteniendo así una velocidad de paso por tubos de 25,02 m/s. Una velocidad elevada para el vapor ya que el intercambio de calor es directamente proporcional a la velocidad de los fluidos, por lo que mayor velocidad de vapor deriva a una mayor eficacia de transferencia.

Una vez se obtiene dicha velocidad, permite hallar el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio (h_c) del interior de los tubos. Para el calculo de dicho coeficiente se precisarán las siguientes propiedades del fluido que circula por tubos. En este caso será del vapor a la temperatura media con la cual circula por el intercambiador, 142,5°C. (Valores obtenidos de la tabla de *propiedades del Vapor de agua*)

- Vapor a $T_{prom}=142,5^{\circ}C$
 - Viscosidad cinemática, μ_c (cSt)=6,71 $\rightarrow 6,71 \cdot 10^{-6} m^2/s$
 - Conductividad térmica, K_f (W/mK)=0,0276
 - Viscosidad dinámica, μ_d (cP)=0,0137 $\rightarrow 1,37 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$
 - Número de Prandtl, $Pr=99,77$

Conductividad térmica obtenida de la siguiente gráfica, por Nick Connor en Thermal Engineering Organization:

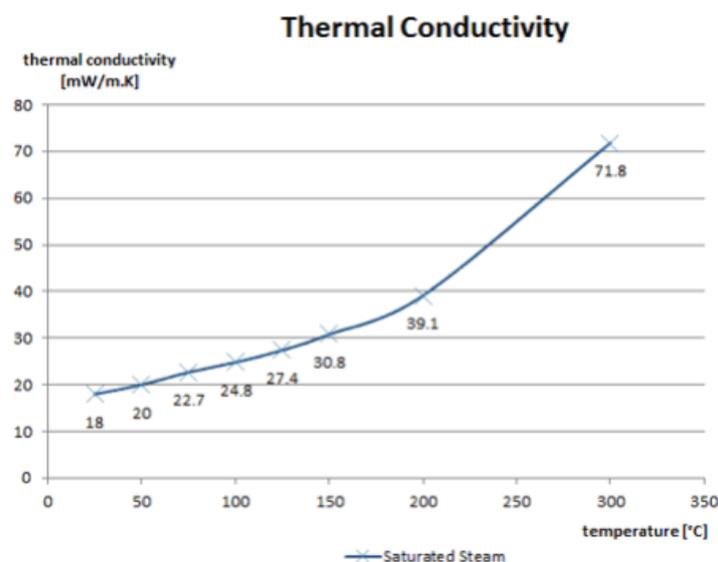


Gráfico 11.1. Conductividad térmica del vapor de agua a diferentes temperaturas

El número de Prandtl se calcula como;

$$Pr = \frac{\mu d \cdot Cp}{Kf}$$

Ecuación 11.72. Número de Prandtl

Con estos datos podemos calcular el número de Reynolds, Re:

$$Re = \frac{v_{vapor} \cdot D_{int,t}}{\mu c}$$

Ecuación 11.73. Número de Reynolds

$$Re = \frac{25,02 \frac{m}{s} \cdot 0,0117m}{6,71 \cdot 10^{-6} m^2/s} = 43618,16 > 2100$$

Se obtiene un número de Reynolds mayor a 2100, considerándose un flujo turbulento, y además de que el valor es mayor que 10000, se utiliza la ecuación de Dittus-Boelter para hallar el número de Nusselt. Se tiene en cuenta que el vapor sufre un fenómeno de calentamiento provocado por la fricción generada contra las paredes de los tubos debido a la alta velocidad de paso.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

Ecuación 11.74. Número de Nusselt mediante Dittus-Boelter

$$Nu = 0,023 \cdot 43618,16^{0.8} \cdot 99,77^{0.4} = 746,56$$

El valor de Nusselt es proporcional al coeficiente de transferencia térmica de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{h_c \cdot D}{Kf}, \text{ asíamos } h_c,$$

$$h_{c_{int}} = \frac{Nu \cdot Kf}{D_{int,t}} = \frac{746,56 \cdot 0,0276 W/mK}{0,0117m} = 1761,42 W/m^2K$$

Ecuación 11.75. Relación del valor de Nusslet con el coeficiente de transferencia

Una vez conseguido el valor del coeficiente interno de los tubos, se realizará el mismo proceso para conseguir el valor del coeficiente de transferencia externo, solamente que este ahora será función de las propiedades y características del corriente de proceso.

Para el sistema de la carcasa, la temperatura promedio es de $T_{c,prom} = T_c = 87,5^\circ C$ entre la entrada y la salida del intercambiador. Mientras que como se ha comentado anteriormente, la temperatura promedio en los tubos es de $142,5^\circ C$, se asume que la temperatura en la zona intermedia de la pared de los tubos, es la media entre ambos

promedios, dando así el valor de 115°C. A partir de aquí, se debe hacer una suposición sobre la temperatura en la cara de la pared exterior del tubo, aproximadamente de 111,3°C. En los sistemas de convección exterior se encuentra la temperatura media entre la pared exterior y el fluido que circula por carcasa, siendo este de 99,4 °C.

A partir de aquí, se buscarán los valores de los parámetros característicos del corriente que circula por carcasa a dicha temperatura. El corriente se compone de una mezcla de Epiclorhidrina y Bifenol-A¹, 79,97% y 20,03% en composición másica respectivamente de un corriente total de 5.9025,64 kg/h.

Las propiedades de dicho corriente a 99,4°C son de:

- Viscosidad cinemática media, μc (m²/s) = $2,3 \cdot 10^{-6}$
- Viscosidad dinámica media, μd (Pa·s) = 0,038

Ambos valores han sido extraídos de la ficha de seguridad de *Sikafloor Ecuatoriana SA*, empresa que distribuye el intermedio Bisfenol-a-epiclorhidrina para la fabricación de Resina epoxy, y utilizan el corriente de epiclorhidrina + bisfenol-A con composición muy similar a la nuestra.

- ρ (kg/m³)= 1500
- Cp Epi (J/gmol·K)= 131,7 → 1,423 kJ/kg/K
- Cp B-A (J/gmol·K)= 533,66 → 2,338 kJ/kg/K
- Cp promedio, Cp_m (kJ/kg/K) = 1,607 kJ/kg/K (valor en función del porcentaje en masa de ambos componentes)
- Coeficiente térmico, Kf (W/m·K)= 0,21

Los valores de calor específico de la epiclorhidrina y bisfenol-A se han obtenido a partir de la base de datos del programa de simulación *SuperPro*. El valor de coeficiente térmico se ha tenido que aproximar a partir de un policarbonato producido principalmente por cadenas de Bisfenol-A reaccionadas con fosgeno (COCl₂).

Conociendo el caudal másico de paso del corriente de producción, debemos calcular la velocidad de paso por la carcasa. Para ello necesitaremos la superficie total del interior de la carcasa menos aquella ocupada por tubos:

$$S_{carcasa} = S_{carcasa\ total} - S_{tubos\ total}$$

¹ Epicloridrina se representará como Epi. Bisfenol-A se representará como B-A.

$$= \pi * \left(\frac{D_{int,carcasa}}{2} \right)^2 - N_{pasos\ tubos\ por\ carcasa} * N_{tubos} * \pi * \left(\frac{D_{ext,tubos}}{2} \right)^2$$

Ecuación 11.76. Superficie de paso por carcasa

$$S_{carcasa} = \pi * \left(\frac{0,496\ m}{2} \right)^2 - 2 * 554 * \pi * \left(\frac{0,015\ m}{2} \right)^2 = 0,100\ m^2$$

Una vez hallada la superficie de paso por carcasa, podemos calcular la velocidad a la que la mezcla transita:

$$Flujo\ másico = v * S * \rho \rightarrow v = \frac{Flujo\ másico}{S * \rho}$$

Ecuación 11.77. Flujo másico en según densidad

$$v = \frac{5.925,64\ \frac{kg}{h} * \frac{1h}{3600\ s}}{0,1\ m^2 * 1190\ kg/m^3} = 13,8 \cdot 10^{-3}\ m/s$$

En el caso del corriente de proceso, para poder hallar el número de Nusselt se utilizará la correlación de Zukauskas en referencia a la convección forzada por la parte exterior de los tubos:

$$Nu = C * Re_D^m * Pr^{1/3}$$

Ecuación 11.78. Número de Nusselt según correlación de Zukauskas

Donde:

$$\begin{aligned} \cdot Re_D &= \frac{v * D_{ext,tubos}}{\mu_c} = \frac{0,0138\ \frac{m}{s} * 0,015m}{2,3 \cdot 10^{-6}\ m^2/s} = 90,014 \\ \cdot Pr &= \frac{0,038\ Pa \cdot s * 1,607\ \frac{kJ}{kg} \cdot K \cdot \frac{1000J}{1kJ}}{0,21W/m \cdot K} = 290,71 \end{aligned}$$

Con el valor del parámetro ReynoldsD, se sacan los valores de m y C según la siguiente tabla:

Tabla 11.16. Valores de las constates C y m según ReD

ReD	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

A partir de aquí ya se puede calcular el valor de Nusselt:

$$Nu = 0,683 * 90,014^{0,466} * 290,71^{1/3} = 538,85$$

Como en el caso de tubos, calcularemos con la misma relación el coeficiente de transferencia externo en función de Nu y $D_{ext,tubos}$:

$$h_{c,ext} = \frac{538,85 * 0,21 W/m \cdot K}{0,015 m} = 7543,92 W/m^2 K$$

Finalmente, cuando se han hallado ambos coeficientes interno y externo, se incorpora la siguiente igualdad:

$$U * A = \frac{1}{R_{total}} = \frac{Q}{LMTD}$$

Ecuación 11.79. Transferencia térmica

R_{total} se define como el sumatorio de todas las resistencias de convección interior y exterior de los tubos y la resistencia de conducción de las paredes (que en este caso, se considerarán menospreciadas en comparación a las demás resistencias).

LMTD son las siglas en inglés de *Logarithmic mean temperature difference*, temperatura media logarítmica en español. Se usa para determinar la fuerza que impulsa la transferencia de calor en sistemas de flujo, particularmente en intercambiadores de calor. Método de relación entre la temperatura del fluido frío y del fluido caliente, que en este caso se plantea para un intercambiador 1-2 en contracorriente:

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

Ecuación 11.80. Temperatura media logarítmica

$$LMTD = \frac{(170 - 150) - (115 - 25)}{\ln \left(\frac{170 - 150}{115 - 25} \right)} = 46,54$$

LMTD es el mismo valor para cualquier unidad de temperatura. Al tratarse de un intercambiador 1-2 se deberá aplicar un factor de corrección sobre el resultado, según se muestra en la siguiente gráfica para intercambiadores de un paso por carcasa y dos por tubos (1-2):

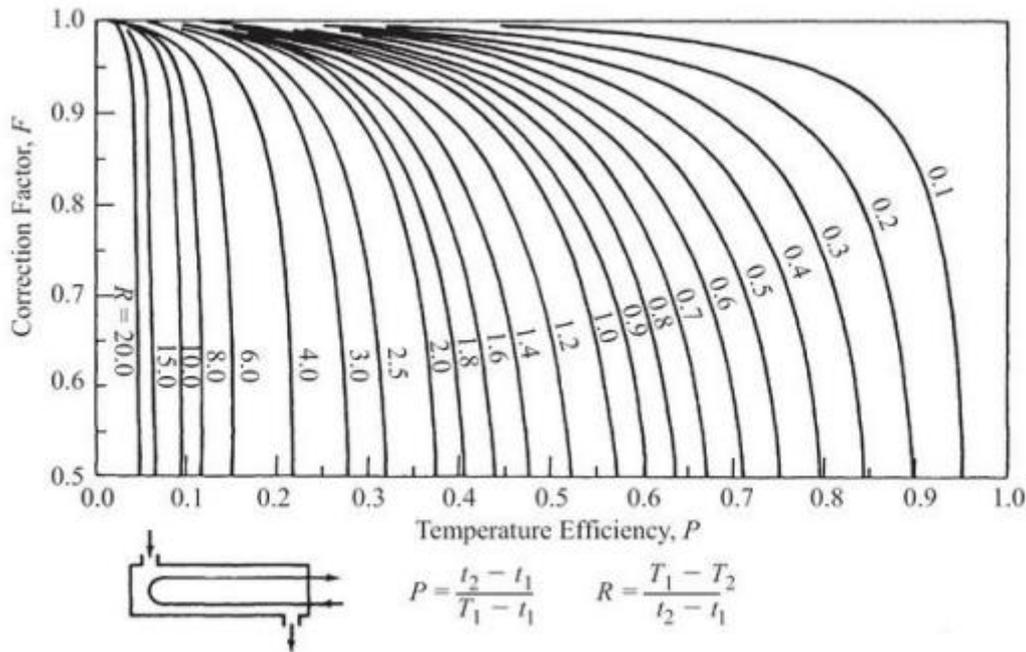


Gráfico 11.2. Factores de corrección para intercambiadores 1-2

Siendo:

$$P = \frac{150-25}{170-25} = 0,862 \quad \text{y} \quad R = \frac{170-115}{150-25} = 0,440$$

Según estos valores, se encuentra un valor de factor de corrección de $F=1$, por lo tanto:

$$LMTD' = LMTD * F = 46,54 * 1 = 46,54$$

Para así terminar con la última igualdad, expuesta anteriormente sobre las resistencias totales de convección, donde la única incógnita será la longitud de los tubos:

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{C,int} * A_{int,tubos}} + \frac{1}{h_{C,ext} * A_{ext,tubos}} + R_{ext} + R_{int}}$$

Ecuación 11.81. Ecuación final de transferencia térmica

Como se ha mencionado anteriormente, supondremos R_{ext} y R_{int} menospreciables frente los valores de resistencia por convección, quedando la siguiente ecuación:

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{C,int} * 2 * N_{tubos} * D_{int,t} * L} + \frac{1}{h_{C,ext} * 2 * N_{tubos} * D_{ext,t} * L}}$$

Este valor se calcula mediante la herramienta informática *Solver*, el cual da un valor final de $L=2,032$ m de longitud mínima de tubos. Este valor se multiplicará por un factor de

seguridad del 20% del valor mínimo, debido a posibles problemas con el ensuciamiento de las tuberías y posibles pérdidas energéticas por la carcasa, obteniendo así el valor final de la longitud de tubos utilizada para el intercambiador-200:

$$L_{\text{tubos}} = L_{\text{min}} * 1,2 = 2,438 \text{ m} \approx \mathbf{2,5 \text{ m}}$$

Obtendremos la longitud total de los tubos, pero esta longitud cuenta el doble paso de los tubos, es decir que en el espacio, estos tubos ocupan la mitad ya que están doblados con tal de poder tener el doble paso por carcasa. Obteniéndose así un valor de longitud de los tubos doblados/una ida como la mitad del total, 1,25m. Finalmente, se supone un espacio entre la curva de tubos y la pared de la carcasa de 0,5 m, obteniéndose un valor de **L carcasa=1,75 m**. Tamaño menor al modelo escogido.

Este sería el procedimiento completo del diseño de un intercambiador, concretamente el IC-200. A continuación, se mostrará este procedimiento en un formato más simplificado, al igual que se expondrán el resto de los intercambiadores que siguen el mismo patrón con tal de facilitar y agilizar el seguimiento de su diseño.

El total de los siguientes casos que se expondrán, se habrán basado en modelos ya diseñados y puestos en marcha, únicamente se habrá basado en sus características como guía con tal de poder recrear y diseñar nuestros intercambiadores personalizados.

IC 200

MODELO

Intercambiador 6E-121

Tamaño

H (altura)= 4,528 m
A (ancho)= 0,5 m
Espesor carcasa= 0,004 m

Tubos:

Longitud= 4,028 m
Diámetro= 0,015 m
Espesor= 16 BWG= 0,001651 m
N tubos= 544 tubos

Datos de diseño

Presión diseño carcasa= 8,1 Kg/cm²
Presión diseño tubos= 10,5 Kg/cm²
Temperatura diseño carcasa= 196 °C
Temperatura diseño tubos= 250 °C

Disposición horizontal

Material: SA-179

Fluido Tubos: Vapor

Fluido Carcasa: Corriente de proceso

Calculo y diseño de operación

$$Q \text{ (kW)} = 330,030$$

Carcasa

$$\Delta T_c \text{ (}^\circ\text{C)} = 125$$

$$T_{c,1} \text{ (}^\circ\text{C)} = 25$$

$$T_{c,2} \text{ (}^\circ\text{C)} = 150$$

$$T_c, \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 87,5$$

Tubos

$$\Delta T_t \text{ (}^\circ\text{C)} = -55$$

suposición

$$T_{t,1} \text{ (}^\circ\text{C)} = 170$$

$$T_{t,2} \text{ (}^\circ\text{C)} = 115$$

suposición

$$T_t, \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 142,5$$

Fluido refrigerante --> Vapor

Datos:

$$C_p \text{ (kJ/kg/K)} = 2,01$$

$$\Delta T_t \text{ (}^\circ\text{C)} = -55$$

$$Q \text{ (kW)} = -330,030$$

m=?

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

$$m = \frac{Q}{c_p \times \Delta T}$$

$$m \text{ (kg/s)} = 2,985$$

$$m \text{ (kg/h)} = 10747,23$$

Repartido por todos los tubos

$$m \text{ tubo (kg/s)} = 0,00549$$

$$\text{Diametro tubo, ext (m)} = 0,015$$

$$\text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} = 0,001651$$

$$\text{Diametro tubo, int (m)} = 0,011698$$

$$\text{Area int tubos, S (m}^2\text{)} = 0,000859811$$

Calcularemos la velocidad del fluido, v

$$v = \frac{m \times V_e}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Datos:

$$\text{Flujo másico [tubos], m (kg/s)} = 0,00549$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,011698$$

$$\text{Volumen específico, } V_e \text{ (m}^3\text{/kg)} = 0,49$$

En la densidad, se toma un valor promedio entre ambas temperaturas.

$$T \text{ densidad (}^\circ\text{C)} = 142,5$$

Calculamos v:

velocidad del fluido, v (m/s)= 25,0194775

Calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio (h_c) en el interior de los tubos

$$Re = \frac{v \times D_{t,int}}{\mu}$$

Datos:

T promedio (°C)= 142,5

Viscosidad cinemática, μ (cSt)= 6,71

Viscosidad cinemática, μ (m²/s)= 0,00000671

$D_{t,int}$ (m)= 0,011698

Calculamos Re

Re= 43618,15913

Re>2100 flujo turbulento

Re>10000 Utilizamos ec. Dittus-Boelter para encontrar núm de Nusselt

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Donde

Conductividad térmica, K_f (W/mK)= 0,0276

$$Pr = \frac{\mu/\rho}{K_f/(c_p \times \rho)}$$

Viscosidad dinámica, μ (cP)= 0,0137

Viscosidad dinámica, μ (Pa·s)= 0,0000137

Pr= 99,77173913

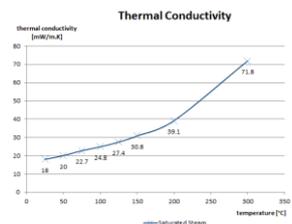
Calculamos:

Nu= 746,5600033

$$Nu = \frac{h_c \times D}{K_f}$$

$$h_{c,int} = \frac{Nu \times K_f}{D_{t,int}}$$

$h_{c,int}$ (W/m²K)= 1761,417002



Carcasa

Tc, promedio (°C)= 87,5
 Tt, promedio (°C)= 142,5
 T pared tubos es promedio de ambos fluidos (°C)= 115
 Suponemos Tp,ext tubos (°C)= 111,3
 Tmedia entre Tp,ext y Tmedia fluido (°C)= 99,4 Tm

Propiedades corriente a Tpared:
 Fluido mezcla Epiclorhidrina + Bisfenol-A

Tm (°C)= 99,4
 Viscosidad cinemática media, μ_c = 0,0000023 m²/s
 Viscosidad dinámica media, μ_d = 0,038 Pa·s
 ρ (kg/m³)= 1190
 Cp Epi (J/gmol·K)= 131,7 Fuente: Superpro
 Cp B-A (J/gmol·K)= 533,66 Fuente: Superpro
 Cp Epi (kJ/kg/K)= 1,423
 Cp B-A (kJ/kg/K)= 2,338
 Flujo Epi (kg/h)= 4738,601
 Flujo B-A (kg/h)= 1187,040
 Cp promedio, Cpm(kJ/kg/K)= 1,607 Promedio
 Kf (W/(m·K))= 0,21 [sumatorio(%cabal_i*cp_i)]

Calcular la superficie total interior carcasa menos ocupado por tubos

$$S \text{ (m}^2\text{)} = 0,1002168$$

*Formula flujo másico

$$v \text{ (m/s)} = 0,013802104$$

Hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3} \quad Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu}$$

$$Re_D = 90,01371919$$

$$Pr = 290,7113685$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

$$Nu = 538,8517797$$

$$h_{c,ext} \text{ (W/m}^2\text{/K)} = 7543,924916$$

$$UxA = \frac{1}{R_{total}}$$

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$UxA = \frac{Q}{LMTD}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$LMTD = 46,54015821$$

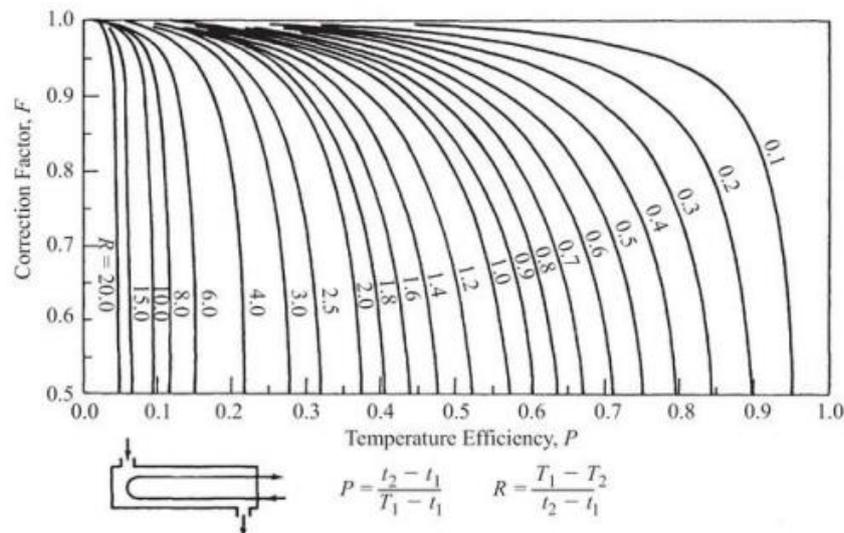


Figure 10: Factor de corrección de la diferencia de temperatura media logarítmica para intercambiadores de tubo y carcasa con un sólo paso por la carcasa y pasando por el tubo dos veces.

$$P = 0,862068966$$

$$R = 0,44$$

$$F = 1$$

$$LMTD' = 46,54015821$$

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

Incognita L

$$A_i = 2 \times N_{tubos} \times D_t \times L$$

Solver

L mínima de operación (m) = 2,032

$$L(m) = 2,4384$$

20% seguridad

L tubos, utilizada(m) = 2,5

L tubos doblado (m) = 1,25

L carcasa(m) = 1,5

11.6.3. Diseño IC-201

IC 201

MODELO

Intercambiador ME 156-209-E2

Tamaño

H (altura)= 2 m
A (ancho)= 0,4 m
Espesor carcasa= 0,004 m

Tubos:

Longitud= 1,5 m
Diámetro= 0,01905 m
Espesor= 13 BWG= 0,002769 m
N tubos= 170 tubos

Datos de diseño

Presión diseño carcasa= 17,34 Kg/cm²
Presión diseño tubos= 8,16 Kg/cm²
Temperatura diseño carcasa= 540 °C
Temperatura diseño tubos= 250 °C

Disposición horizontal

Material: SA-179

Fluido Tubos: Agua

Fluido Carcasa: Corriente proceso

Calculo y diseño de operación

Q (kW) = -176,676
Carcasa

ΔT_c (°C)= -70
 $T_{c,1}$ (°C)= 150
 $T_{c,2}$ (°C)= 80
 T_c , promedio(°C)= 115

Tubos

ΔT_t (°C)= 5 suposición
 $T_{t,1}$ (°C)= 20
 $T_{t,2}$ (°C)= 25 suposición
 T_t , promedio (°C)= 22,5

Fluido refrigerante --> Agua

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

Datos:

$$Cp \text{ H}_2\text{O (kJ/kg/}^\circ\text{C)} = 4,186$$

$$\Delta T (\text{ }^\circ\text{C)} = 5$$

$$Q (\text{kW}) = 176,676$$

m=?

$$\frac{(\dot{m} \times cp)_{\text{Caliente}}}{(\dot{m} \times cp)_{\text{Frio}}} = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_C}$$

$$m (\text{kg/s}) = 57,987$$

$$m (\text{kg/h}) = 208752,23$$

Repartido por todos los tubos

$$m \text{ tubo (kg/s)} = 0,34110$$

$$\text{Diametro tubo, ext (m)} = 0,01905$$

$$\text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} = 0,002769$$

$$\text{Diametro tubo, int (m)} = 0,013512$$

$$\text{Area int tubos, S (m}^2\text{)} = 0,001147147$$

Calcularemos la velocidad del fluido, v

$$v = \frac{m \times V_e}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Datos:

$$\text{Flujo másico [tubos], m (kg/s)} = 0,341098421$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,013512$$

$$V_e \text{ (m}^3\text{/Kg)} = 0,001$$

En la densidad, se toma un valor promedio entre ambas temperaturas.

$$T \text{ densidad (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

Calculamos v:

$$\text{velocidad del fluido, v (m/s)} = 2,378759603$$

Calcular el coeficiente de transferencia de calor
por convección promedio (hc) en el interior de los tubos

$$Re = \frac{v \times D_{t,int}}{\mu}$$

Datos:

$$T \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (cSt)} = 0,865$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (m}^2\text{/s)} = 8,65\text{E-}07$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,013512$$

Calculamos Re

$$Re = 37158,15001$$

Re > 2100 Turbulento

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Donde

Conductividad térmica, K_f (W/mK) = 0,6

$$Pr = \frac{\mu/\rho}{K_f/(c_p \times \rho)}$$

c_p en Pa*s

Viscosidad dinámica, μ (cP) = 0,885

Viscosidad dinámica, μ (Pa·s) = 0,000885

$$Pr = 14,29$$

Calculamos:

$$Nu = 301,8450057$$

$$Nu = \frac{h_c \times D}{K_f}$$

$$h_{c,int} = \frac{Nu \times K_f}{D_{t,int}}$$

$$h_{c,int} \text{ (W/m}^2\text{K)} = 13403,41944$$

Carcasa

T_c , promedio (°C) = 115

T_t , promedio (°C) = 22,5

T pared tubos es promedio de ambos fluidos (°C) = 68,75

Suponemos $T_{p,ext}$ tubos (°C) = 65,05

T_{media} entre $T_{p,ext}$ y T_{media} fluido (°C) = 90,025

T_m

Propiedades corriente a T_{pared} :

Fluido mezcla Epichlorhidrina + Bisfenol-A + BTAC + BPH + H₂O

$$T_m \text{ (°C)} = 90,025$$

Viscosidad cinemática media, μ_c = 0,0000065 m²/s

Viscosidad dinámica media, μ_d = 0,04 Pa·s

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1200$$

C_p Epi (J/gmol·K) = 131,7 Superpro

C_p B-A (J/gmol·K) = 533,66 Superpro

C_p Epi (kJ/kg/K) = 1,423

C_p B-A (kJ/kg/K) = 2,338

C_p BPH (kJ/kg/K) = 1,698

$$\begin{aligned} C_p \text{ BTAC (kJ/kg/K)} &= 1,151 \\ C_p \text{ H}_2\text{O (kJ/kg/K)} &= 4,186 \\ C_p \text{ promedio, } C_{pm} \text{ (kJ/kg/K)} &= 1,527 & [\text{sumatorio}(\%cabal_i * cp_i)] \\ K_f \text{ (W/(m}\cdot\text{K))} &= 0,21 \end{aligned}$$

Calcular la superficie total interior carcasa menos ocupado por tubos

$$S \text{ (m}^2\text{)} = 0,0769100$$

*Formula flujo másico

$$v \text{ (m/s)} = 0,107897335$$

Hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3} \qquad Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu}$$

$$Re_D = 316,2221891$$

$$Pr = 290,9459405$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

$$Nu = 810,4131427$$

$$h_{c,ext} \text{ (W/m}^2\text{/K)} = 8933,688187$$

$$U_{xA} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$U_{xA} = \frac{Q}{LMTD}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$LMTD = 88,55957744$$

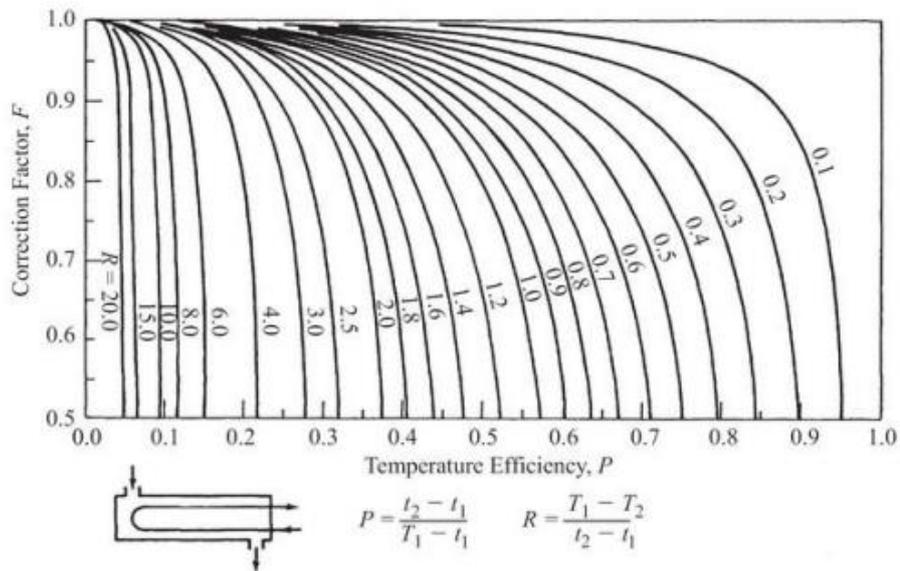


Figure 10: Factor de corrección de la diferencia de temperatura media logarítmica para intercambiadores de tubo y carcasa con un sólo paso por la carcasa y pasando por el tubo dos veces.

$P = 0,538461538$ $R = 0,071429$ $F = 1$
 $LMTD' = 88,55957744$

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

Incognita L

$A_i = 2 \times N_{tubos} \times Dt_i \times L$
L mínima de operación (m) = 1,2
 L (m) = 1,44
L tubos, utilizada (m) = 1,50
L carcasa (m) = 2,00

Solver

20% seguridad

11.6.4. Diseño IC-300

IC 300

MODELO

Intercambiador MO-E52

Tamaño

H (altura)= 4,5 m
A (ancho)= 0,3 m
Espesor carcasa= 0,0025 m

Tubos:

Longitud= 4,25 m
Diámetro= 0,01 m
Espesor= 14 BWG= 0,002 m
N tubos= 180 tubos

Datos de diseño

Presión diseño carcasa= 15,01 Kg/cm²
Presión diseño tubos= 16,68 Kg/cm²
Temperatura diseño carcasa= 230 °C
Temperatura diseño tubos= 310 °C

Disposición horizontal

Material: SA-179

Fluido Tubos: Agua

Fluido Carcasa: Corriente proceso +viscoso

Calculo y diseño de operación

Q (kW) = -145,161
Carcasa

ΔT_c (°C)= -50
 $T_{c,1}$ (°C)= 80
 $T_{c,2}$ (°C)= 30
 T_c , promedio(°C)= 55

Tubos

ΔT_t (°C)= 5 suposición
 $T_{t,1}$ (°C)= 20
 $T_{t,2}$ (°C)= 25 suposición
 T_t , promedio (°C)= 22,5

Fluido refrigerante --> Agua

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

Datos:

$$Cp \text{ H}_2\text{O (kJ/kg/}^\circ\text{C)} = 4,186$$

$$\Delta T_t (^\circ\text{C)} = 5$$

$$Q(\text{kW}) = 145,1607241$$

m=?

$$m = \frac{Q}{cp \times \Delta T}$$

$$m \text{ (kg/s)} = 6,935533877$$

$$m \text{ (kg/h)} = 24967,92$$

Repartido por todos los tubos

$$m \text{ tubo (kg/s)} = 0,03853$$

$$\text{Diametro tubo, ext (m)} = 0,01$$

$$\text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} = 0,002$$

$$\text{Diametro tubo, int (m)} = 0,006$$

$$\text{Area int tubos, S (m}^2\text{)} = 2,26195\text{E-}05$$

Calcularemos la velocidad del fluido, v

$$v = \frac{m \times V_e}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Datos:

$$\text{Flujo másico [tubos], m (kg/s)} = 0,038530744$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,006$$

$$V_e \text{ (m}^3\text{/kg)} = 0,001$$

En la densidad, se toma un valor promedio entre ambas temperaturas.

$$T \text{ densidad (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

Calculamos v:

$$\text{velocidad del fluido, v (m/s)} = 1,362746296$$

Calcular el coeficiente de transferencia de

calor por convección promedio () en el interior de los tubos

$$Re = \frac{v \times D_{t,int}}{\mu}$$

Datos:

$$T \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (cSt)} = 0,85$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (m}^2\text{/s)} = 8,50\text{E-}07$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,006$$

Calculamos Re

$$Re = 9619,385617 > 2100$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Donde

Conductividad térmica, K_f (W/mK) = 0,609

$$Pr = \frac{\mu/\rho}{K_f/(c_p \times \rho)} \quad c_p \text{ en Pa}\cdot\text{s}$$

Viscosidad dinámica, μ (cP) = 0,868

Viscosidad dinámica, μ (Pa·s) = 0,000868

Pr = 14,29

Calculamos:

$$Nu = 102,3902481$$

$$Nu = \frac{h_c \times D}{K_f} \quad h_{c,int} = \frac{Nu \times K_f}{D_{t,int}}$$

$$h_{c,int} \text{ (W/m}^2\text{K)} = 10392,61018$$

Carcasa

T_c , promedio (°C) = 55

T_t , promedio (°C) = 22,5

T pared tubos es promedio de ambos fluidos (°C) = 38,75

Suponemos $T_{p,ext}$ tubos (°C) = 35,05

T_{media} entre $T_{p,ext}$ y T_{media} fluido (°C) = 45,025 T_m

Propiedades corriente a T_{pared} :

Fluido mezcla Epiclorhidrina + H₂O

T_m (°C) = 45,025

Viscosidad cinemática media, μ_c = 0,00000598 m²/s

Viscosidad dinámica media, μ_d = 0,00069 Pa·s

ρ (kg/m³) = 999

C_p Epi (J/gmol·K) = 131,7 Superpro

C_p Epi (kJ/kg/K) = 1,423

C_p H₂O (kJ/kg/K) = 4,186

C_p promedio, C_{pm} (kJ/kg/K) = 3,981 [sumatorio(%cabal_i* $c_{p,i}$)]

K_f (W/(m·K)) = 0,58

Calcular la superficie total interior carcasa menos ocupado por tubos

$$S \text{ (m}^2\text{)} = 0,0299708$$

*Formula flujo másico

$$v \text{ (m/s)} = 0,224$$

Hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3}$$

$$Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu}$$

$$Re_D = 375,2053502$$

$$Pr = 4,736143029$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

$$Nu = 170,7393496$$

$$h_{c,ext} (W/m^2/K) = 9902,882279$$

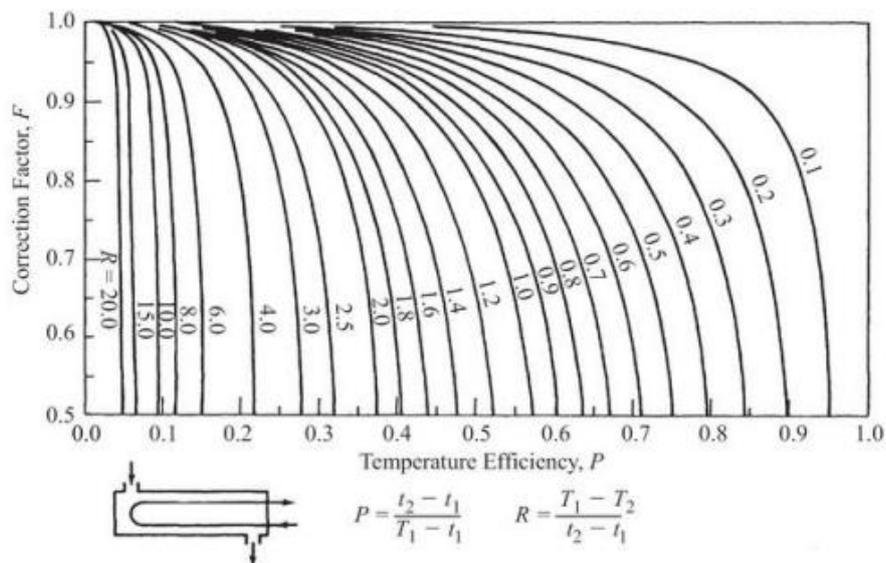
$$UxA = \frac{1}{R_{total}}$$

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$UxA = \frac{Q}{LMTD}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$LMTD = 26,39686192$$



$$P = 0,833333333$$

$$R = 0,1$$

$$F = 0,97$$

$$LMTD' = 25,60495606$$

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

Incognita L

$$A_i = 2 \cdot N_{tubos} \cdot D_t \cdot L$$

Solver

L mínima de operación (m)= 3,517

L (m)= 4,2204

20% seguridad

L tubos, utilizada(m)= 4,5

L carcasa (m)= 5

11.6.5. Diseño IC-301

IC 301

MODELO

Intercambiador 6E-121

Tamaño

H (altura)= 2 m
A (ancho)= 0,4 m
Espesor carcasa= 0,004 m

Tubos:

Longitud= 1,8 m
Diámetro= 0,01 m
Espesor= 13 BWG= 0,002413 m
N tubos= 120 tubos

Datos de diseño

Presión diseño carcasa= 8 Kg/cm²
Presión diseño tubos= 10,5 Kg/cm²
Temperatura diseño carcasa= 180 °C
Temperatura diseño tubos= 77 °C

Disposición horizontal

Material: SA-179

Fluido Tubos: Agua

Fluido Carcasa: Corriente proceso

Calculo y diseño de operación

$$Q \text{ (kW)} = -122,042$$

Carcasa

ΔT_c (°C)= -55
 $T_{c,1}$ (°C)= 80
 $T_{c,2}$ (°C)= 25
 T_c , promedio(°C)= 52,5

Tubos

ΔT_t (°C)= 5 suposición
 $T_{t,1}$ (°C)= 20
 $T_{t,2}$ (°C)= 25 suposición
 T_t , promedio (°C)= 22,5

Fluido refrigerante --> Agua

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

Datos:

$$\begin{aligned} \text{Cp H2O (kJ/kg/}^\circ\text{C)} &= 4,186 \\ \Delta T (\text{ }^\circ\text{C)} &= 5 \\ Q(\text{kW)} &= 122,04167 \end{aligned}$$

m=?

$$m = \frac{Q}{cp \times \Delta T}$$

$$\begin{aligned} m \text{ (kg/s)} &= 5,831 \\ m \text{ (kg/h)} &= 2,10\text{E}+04 \end{aligned}$$

Repartido por todos los tubos

$$m \text{ tubo (kg/s)} = 0,04859$$

$$\begin{aligned} \text{Diametro tubo, ext (m)} &= 0,01 \\ \text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} &= 0,002413 \\ \text{Diametro tubo, int (m)} &= 0,005174 \\ \text{Area int tubos, S (m}^2\text{)} &= 0,0001682 \end{aligned}$$

Calcularemos la velocidad del fluido, v

$$v = \frac{m \times V_e}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Datos:

$$\begin{aligned} \text{Flujo másico [tubos], m (kg/s)} &= 0,0485912 \\ D_{t,int} \text{ (m)} &= 0,005174 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen específico, } V_e \text{ (m}^3\text{/kg)} = 0,001$$

En la densidad, se toma un valor promedio entre ambas temperaturas.

$$T \text{ densidad (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

Calculamos v:

$$\text{velocidad del fluido, } v \text{ (m/s)} = \mathbf{2,3110798}$$

Calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio (hc) en el interior de los tubos

$$Re = \frac{v \times D_{t,int}}{\mu}$$

Datos:

$$\begin{aligned} T \text{ promedio (}^\circ\text{C)} &= 22,5 \\ \text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (cSt)} &= 0,801 \\ \text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (m}^2\text{/s)} &= 8,01\text{E}-07 \\ D_{t,int} \text{ (m)} &= 0,005174 \end{aligned}$$

Calculamos Re

$$Re = 14928,248$$

Re > 2100 flujo turbulento

Re > 10000 Utilizamos ec. Dittus-Boelter para encontrar núm de Nusselt

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Donde :

Conductividad térmica, Kf (W/mK) = 0,6

$$Pr = \frac{\mu/\rho}{Kf/(cp \times \rho)}$$

cp en Pa*s

Viscosidad dinámica, μ (Nseg/m²) = 0,9

Viscosidad dinámica, μ (Pa·s) = 0,0009

$$Pr = 14,29$$

Calculamos:

$$Nu = 145,52842$$

$$Nu = \frac{h_c \times D}{Kf}$$

$$h_{c,int} = \frac{Nu \times Kf}{Dt, int}$$

$$h_{c,int} \text{ (W/m}^2\text{K)} = 16876,121$$

Carcasa

Tc, promedio (°C) = 52,5

Tt, promedio (°C) = 22,5

T pared tubos es promedio de ambos fluidos (°C) = 37,5

Suponemos Tp,ext tubos (°C) = 33,8

Tmedia entre Tp,ext y Tmedia fluido (°C) = 43,15

Tm

Propiedades corriente a Tpared:

Fluido mezcla Epiclohidrina + Bisfenol-A + BTAC + BPH + H₂O + NaCl + NaOH + LER + MIBK

Tm (°C) = 43,15

Viscosidad cinemática media, μ_c = 0,0000023 m²/s

Viscosidad dinámica media, μ_d = 0,038 Pa·s

ρ (kg/m³) = 1119,3859

Cp Epi (J/gmol·K) = 131,7 Superpro

Cp B-A (J/gmol·K) = 533,66 Superpro

Cp Epi (kJ/kg/K) = 1,423

- Cp B-A (kJ/kg/K)= 2,338
- Cp BPH (kJ/kg/K)= 1,698
- Cp BTAC (kJ/kg/K)= 1,151
- Cp H2O (kJ/kg/K)= 4,186
- Cp LER (kJ/kg/K)= 2,062
- Cp NaOH (kJ/kg/K)= 2,180
- Cp NaCl (kJ/kg/K)= 2,615
- Cp MIBK (kJ/kg/K)= 2,196
- Cp promedio, Cpm(kJ/kg/K)= 2,173 [sumatorio(%cabal_i*cp_i)]
- Kf (W/(m·K))= 0,65

Calcular la superficie total interior carcasa menos ocupado por tubos

$$S \text{ (m}^2\text{)} = 0,1206176$$

*Formula flujo másico

$$v \text{ (m/s)} = 1,738258$$

Hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3}$$

$$Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu}$$

$$Re_D = 7557,6433$$

$$Pr = 127,02167$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

$$Nu = 2037,777$$

$$h_{c,ext} \text{ (W/m}^2\text{/K)} = 132455,5$$

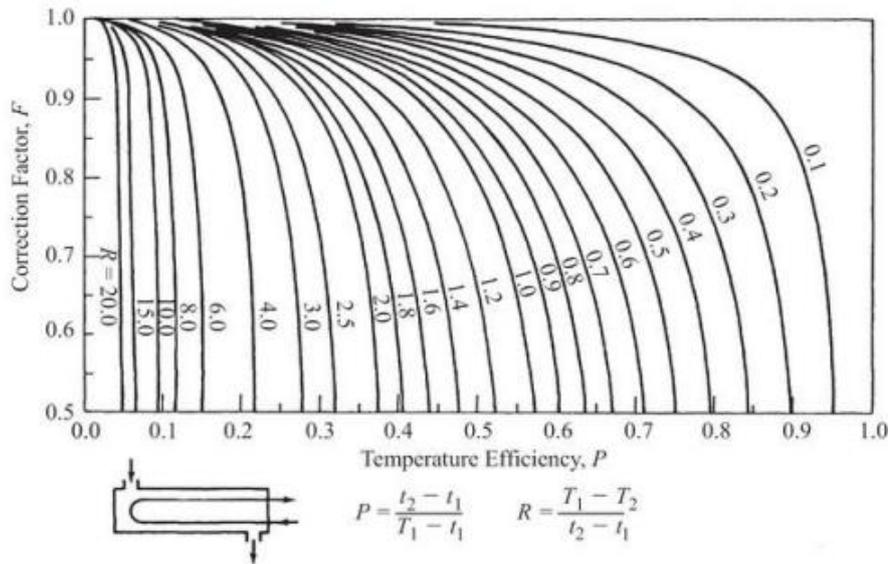
$$U_{xA} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$U_{xA} = \frac{Q}{LMTD}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$LMTD = 20,85162$$



P= 0,916666667

R= 0,090909

F= 0,93

LMTD'= 19,392006

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

Incognita L

$$A_i = 2 \times N_{tubos} \times Dt_i \times L$$

Solver

L mínima de operación (m)= 2,436

L (m)= 2,923

20% seguridad

L tubos, utilizado (m)= 3,0

L tubos doblado (m)= 1,5

L carcasa (m)= 2,0

11.6.6. IC-500

IC 500

MODELO

Intercambiador HL-B-E-101 A/B

Tamaño

H (altura)= 4 m
A (ancho)= 0,3 m
Espesor carcasa= 0,0025 m

Tubos:

Longitud= 3,8 m
Diámetro= 0,015875 m
Espesor= 18 BWG= 0,001245 m
N tubos= 56 tubos

Datos de diseño

Presión diseño carcasa= 7 Kg/cm²
Presión diseño tubos= 7 Kg/cm²
Temperatura diseño carcasa= 110 °C
Temperatura diseño tubos= 110 °C

Disposición horizontal

Material: SA-179

Fluido Tubos: Vapor

Fluido Carcasa: Corriente proceso

Calculo y diseño de operación

$$Q \text{ (kW)} = 146,197$$

Carcasa

$\Delta T_c \text{ (}^\circ\text{C)} = 55$
 $T_{c,1} \text{ (}^\circ\text{C)} = 25$
 $T_{c,2} \text{ (}^\circ\text{C)} = 80$
 $T_c, \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 52,5$

Tubos

$\Delta T_t \text{ (}^\circ\text{C)} = -60$ suposición
 $T_{t,1} \text{ (}^\circ\text{C)} = 170$
 $T_{t,2} \text{ (}^\circ\text{C)} = 110$ suposición
 $T_t, \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 140$

Fluido refrigerante --> Vapor

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

Datos:

$$Cp \text{ vapor (kJ/kg/}^\circ\text{C)} = 2,1752$$

$$\Delta T (\text{ }^\circ\text{C)} = -60$$

$$Q (\text{kW}) = -146,197$$

m=?

$$m = \frac{Q}{cp \times \Delta T}$$

$$m (\text{kg/s}) = 1,120$$

$$m (\text{kg/h}) = 4,03\text{E}+03$$

Repartido por todos los tubos

$$m \text{ tubo (kg/s)} = 0,02000$$

$$\text{Diametro tubo, ext (m)} = 0,015875$$

$$\text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} = 0,001245$$

$$\text{Diametro tubo, int (m)} = 0,013385$$

$$\text{Area int tubos, S (m}^2\text{)} = 0,0011257$$

Calcularemos la velocidad del fluido, v

$$v = \frac{m \times V_e}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Datos:

$$d = D_{\text{int, tubos}} \text{ (m)} = 0,013385$$

$$\text{Flujo másico [tubos], } m \text{ (kg/s)} = 0,02000$$

$$\text{Volumen específico, } V_e \text{ (m}^3\text{/kg)} = 0,177$$

En la densidad, se toma un valor promedio entre ambas temperaturas.

$$T \text{ densidad (}^\circ\text{C)} = 140$$

Calculamos v:

$$\text{velocidad del fluido, } v \text{ (m/s)} = 25,162085$$

Calcular el coeficiente de transferencia de

$$Re = \frac{v \times D_{t, \text{int}}}{\mu}$$

Datos:

$$T \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 140$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (cSt)} = 0,7234$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (m}^2\text{/s)} = 7,234\text{E}-07$$

$$D_{t, \text{int}} \text{ (m)} = 0,013385$$

Calculamos Re

$$Re = 465571,61$$

Re > 2100 flujo turbulento

Re > 10000 Utilizamos ec. Dittus-Boelter para encontrar núm de Nusselt

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Donde

Conductividad térmica, K_f (W/mK) = 0,268

$$Pr = \frac{\mu/\rho}{K_f/(c_p \times \rho)}$$

c_p en Pa*s

Viscosidad dinámica, μ (cP) = 0,013129

Viscosidad dinámica, μ (Pa*s) = 1,313E-05

Pr = 0,1065605

Calculamos:

$$Nu = 14,036018$$

$$Nu = \frac{h_c \times D}{K_f}$$

$$h_{c,int} = \frac{Nu \times K_f}{D_{t,int}}$$

$h_{c,int}$ (W/m²K) = 281,03495

Carcasa

T_c , promedio (°C) = 52,5

T_t , promedio (°C) = 140

T pared tubos es promedio de ambos fluidos (°C) = 96,25

Suponemos $T_{p,ext}$ tubos (°C) = 92,55

T_{media} entre $T_{p,ext}$ y T_{media} fluido (°C) = 72,525

T_m

Propiedades corriente a T_{pared} :

Fluido mezcla Epichlorhidrina + Bisfenol-A + BPH + H₂O

T_m (°C) = 72,525

Viscosidad cinemática media, μ_c = 0,000023 m²/s

Viscosidad dinámica media, μ_d = 0,038 Pa*s

ρ (kg/m³) = 1500

C_p Epi (J/gmol·K) = 131,7 Superpro

C_p B-A (J/gmol·K) = 533,66 Superpro

$$\begin{aligned}
 C_p \text{ Epi (kJ/kg/K)} &= 1,423 \\
 C_p \text{ B-A (kJ/kg/K)} &= 2,338 \\
 C_p \text{ BPH (kJ/kg/K)} &= 1,698 \\
 C_p \text{ H}_2\text{O (kJ/kg/K)} &= 4,186 \\
 C_p \text{ LER (kJ/kg/K)} &= 2,062 \\
 C_p \text{ NaOH (kJ/kg/K)} &= 2,180 \\
 C_p \text{ NaCl (kJ/kg/K)} &= 2,615 \\
 C_p \text{ MIBK (kJ/kg/K)} &= 2,196 \\
 C_p \text{ promedio, Cpm(kJ/kg/K)} &= 2,091 \quad [\text{sumatorio}(\%cabal_i * c_{p_i})] \\
 K_f \text{ (W/(m}\cdot\text{K))} &= 0,38
 \end{aligned}$$

Calcular la superficie total interior carcasa menos ocupado por tubos

$$S \text{ (m}^2\text{)} = 0,0549263$$

*Formula flujo másico

$$v \text{ (m/s)} = 0,7467654$$

Hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3} \qquad Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu}$$

$$Re_D = 5154,3044$$

$$Pr = 209,10834$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

$$Nu = 2648,0642$$

$$h_{c,ext} \text{ (W/m}^2\text{/K)} = 63386,734$$

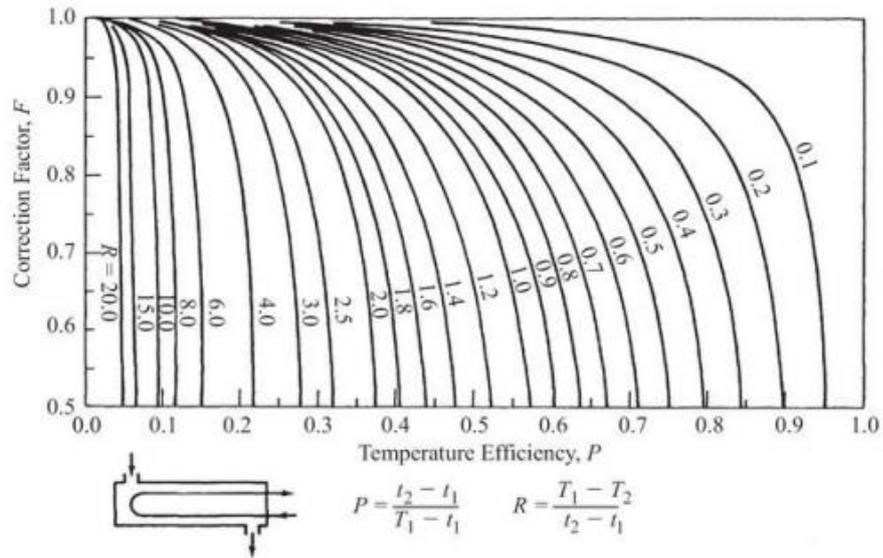
$$U_{xA} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$U_{xA} = \frac{Q}{LMTD}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$LMTD = 87,476185$$



P= 0,379310345 R= 1,090909 F= 0,96
LMTD'= 83,977138

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

Incognita L

$A_i = 2 \times N_{tubos} \times Dt_i \times L$ Solver

L mínima de operación (m)= 4,172

L (m)= 5,01

20% seguridad

L tubos, utilizada (m)= 5,00

L tubos doblado (m)= 2,50

L carcasa (m)= 3,00

11.6.7. Diseño IC-602-1

IC 602-1

MODELO
Creación propia

Tamaño

H (altura)= 5,7 m
A (ancho)= 0,35 m
Espesor carcasa= 0,0025 m

Tubos:

Longitud= 5,53 m suposición
Diámetro=3/8"= 0,01 m
Espesor= 14 BWG= 0,0021 m
N tubos= 90 tubos

Datos de diseño

Presión diseño carcasa= 15,01 Kg/cm²
Presión diseño tubos= 16,68 Kg/cm²
Temperatura diseño carcasa= 230 °C
Temperatura diseño tubos= 310 °C

Disposición horizontal

Material: SA-179

Fluido Tubos: Agua

Fluido Carcasa: Corriente proceso +viscoso

Calculo y diseño de operación

Q (kW) = -100,354
Carcasa
 ΔT_c (°C)= -79
 $T_{c,1}$ (°C)= 114
 $T_{c,2}$ (°C)= 35
 T_c , promedio(°C)= 74,5

Tubos

ΔT_t (°C)= 5 suposición
 $T_{t,1}$ (°C)= 20
 $T_{t,2}$ (°C)= 25 suposición
 T_t , promedio (°C)= 22,5

Fluido refrigerante --> Agua

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

Datos:

$$Cp \text{ H}_2\text{O (kJ/kg/}^\circ\text{C)} = 4,186$$

$$\Delta T (\text{ }^\circ\text{C)} = 5$$

$$Q(\text{kW}) = 106,468$$

m=?

$$m = \frac{Q}{cp \times \Delta T}$$

$$m \text{ (kg/s)} = 5,087$$

$$m \text{ (kg/h)} = 1,83\text{E}+04$$

Repartido por todos los tubos

$$m \text{ tubo (kg/s)} = 0,05652$$

$$\text{Diametro tubo, ext (m)} = 0,01$$

$$\text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} = 0,0021$$

$$\text{Diametro tubo, int (m)} = 0,0058$$

$$\text{Area int tubos, S (m}^2\text{)} = 0,000211366$$

Calcularemos la velocidad del fluido, v

$$v = \frac{m \times V_e}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Datos:

$$\text{Flujo másico [tubos], m (kg/s)} = 0,05652052$$

$$D_{t,int}(\text{m}) = 0,0058$$

$$V_e \text{ (m}^3\text{/kg)} = 0,001002004$$

En la densidad, se toma un valor promedio entre ambas temperaturas.

$$T \text{ densidad (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

Calculamos v:

$$\text{velocidad del fluido, v (m/s)} = 2,144$$

Calcular el coeficiente de transferencia de

$$Re = \frac{v \times D_{t,int}}{\mu}$$

Datos:

$$T \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (cSt)} = 0,859$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (m}^2\text{/s)} = 8,59\text{E}-07$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,0058$$

Calculamos Re

$$Re = 14473,2002 > 2100$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Donde

Conductividad térmica, Kf (W/mK)= 0,633

$$Pr = \frac{\mu/\rho}{Kf/(cp \times \rho)} \quad \text{cp en Pa}\cdot\text{s}$$

Viscosidad dinámica, μ (cP)= 0,85

Viscosidad dinámica, μ (Pa·s)= 0,00085

$$Pr = 5,621011058$$

Calculamos:

$$Nu = 97,74741195$$

$$Nu = \frac{h_c \times D}{Kf}$$

$$h_{c,int} = \frac{Nu \times Kf}{Dt,int}$$

$$h_{c,int} \text{ (W/m}^2\text{K)} = 10667,9503$$

Carcasa

Tc, promedio (°C)= 74,5

Tt, promedio (°C)= 22,5

T pared tubos es promedio de ambos fluidos (°C)= 48,5

Suponemos Tp,ext tubos (°C)= 44,8

Tmedia entre Tp,ext y Tmedia fluido (°C)= 59,65 Tm

Propiedades corriente a Tpared:

Fluido mezcla Epiclorhidrina + MIBK + H2O

Tm (°C)= 59,65

Viscosidad cinemática media, μ_c = 0,00000598 m²/s

Viscosidad dinámica media, μ_d = 0,00069 Pa·s

ρ (kg/m³)= 999

Cp Epi (J/gmol·K)= 131,7 Superpro

Cp Epi (kJ/kg/K)= 1,423

Cp MIBK (kJ/kg/K)= 1,151

Cp H2O (kJ/kg/K)= 4,186

Cp promedio, Cpm(kJ/kg/K)= 1,548 [sumatorio(%cabal_i*cp_i)]

Kf (W/(m·K))= 0,5

Calcular la superficie total interior carcasa menos ocupado por tubos

$$S \text{ (m}^2\text{)} = 0,0771883$$

*Formula flujo másico

$$v \text{ (m/s)} = 0,0865$$

Hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3}$$

$$Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu}$$

$$Re_D = 144,7209656$$

$$Pr = 2,136875826$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

$$Nu = 49,41813954$$

$$h_{c,ext} \text{ (W/m}^2\text{/K)} = 2470,906977$$

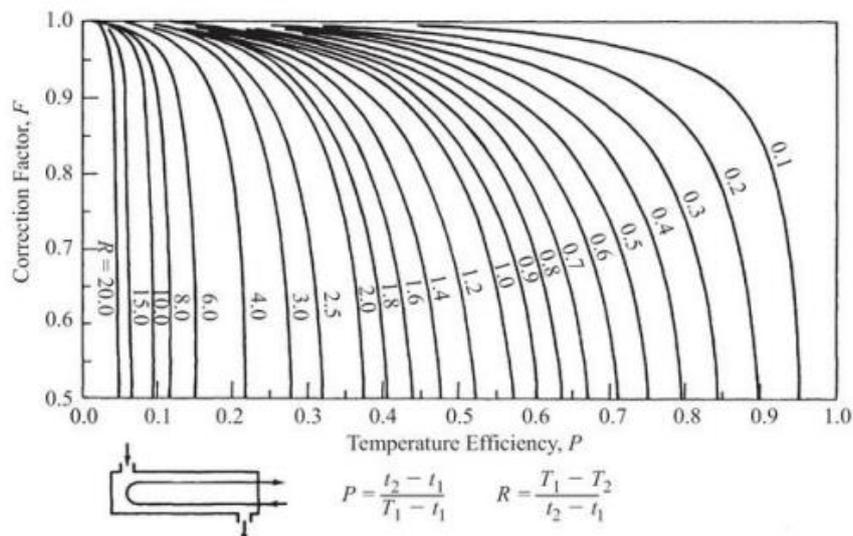
$$UxA = \frac{1}{R_{total}}$$

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$UxA = \frac{Q}{LMTD}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$LMTD = 41,55934787$$



P= 0,840425532

R= 0,063291

F= 0,99

LMTD'= 41,14375439

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

Incognita L

$A_i = 2 \cdot N_{tubos} \cdot D_t \cdot L$

Solver

L mínima de operación (m)= 6,841

L (m)= 8,21

20% seguridad

L tubos,utilizada (m)= 7,00

L tubos,doblado (m)= 3,5

L carcasa (m)= 4,00

11.6.8. Diseño IC-602-2

IC 602-2

MODELO
Creación propia

Tamaño

H (altura)= 4,5 m
A (ancho)= 0,5 m
Espesor carcasa= 0,003 m

Tubos:

Longitud= 4 m suposición
Diámetro=13/16"= 0,015 m
Espesor= 14 BWG= 0,0021 m
N tubos= 80 tubos

Datos de diseño

Presión diseño carcasa= 15,01 Kg/cm²
Presión diseño tubos= 16,68 Kg/cm²
Temperatura diseño carcasa= 550 °C
Temperatura diseño tubos= 550 °C

Disposición horizontal

Material: Carcasa Hastelloy y Tubos de Viton

Fluido Tubos: Agua

Fluido Carcasa: Corriente proceso +viscoso

Calculo y diseño de operación

$$Q \text{ (kW)} = -184,501$$

Carcasa

$$\begin{aligned}\Delta T_c \text{ (}^\circ\text{C)} &= -295,4 \\ T_{c,1} \text{ (}^\circ\text{C)} &= 330,4 \\ T_{c,2} \text{ (}^\circ\text{C)} &= 35 \\ T_{c, \text{ promedio}} \text{ (}^\circ\text{C)} &= 182,7\end{aligned}$$

Tubos

$$\begin{aligned}\Delta T_t \text{ (}^\circ\text{C)} &= 5 \text{ suposición} \\ T_{t,1} \text{ (}^\circ\text{C)} &= 20 \\ T_{t,2} \text{ (}^\circ\text{C)} &= 25 \text{ suposición} \\ T_{t, \text{ promedio}} \text{ (}^\circ\text{C)} &= 22,5\end{aligned}$$

Fluido refrigerante -->Agua

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

Datos:

$$Cp \text{ H}_2\text{O (kJ/kg/}^\circ\text{C)} = 4,186$$

$$\Delta T (\text{ }^\circ\text{C)} = 5$$

$$Q(\text{kW}) = 186,308$$

m=?

$$m = \frac{Q}{cp \times \Delta T}$$

$$m \text{ (kg/s)} = 8,901$$

$$m \text{ (kg/h)} = 3,20\text{E}+04$$

Repartido por todos los tubos

$$m \text{ tubo (kg/s)} = 0,11127$$

$$\text{Diametro tubo, ext (m)} = 0,015$$

$$\text{Grosor, } \Delta x \text{ (m)} = 0,0021$$

$$\text{Diametro tubo, int (m)} = 0,0108$$

$$\text{Area int tubos, S (m}^2\text{)} = 0,000732871$$

Calcularemos la velocidad del fluido, v

Datos:

$$\text{Flujo másico [tubos], m (kg/s)} = 0,111268464$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,0108$$

$$V_e \text{ (m}^3\text{/kg)} = 0,001002004$$

En la densidad, se toma un valor promedio entre ambas temperaturas.

$$T \text{ densidad (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

Calculamos v:

$$\text{velocidad del fluido, v (m/s)} = 1,217038058$$

$$v = \frac{m \times V_e}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio (hc) en el interior de los tubos

$$Re = \frac{v \times D_{t,int}}{\mu}$$

Datos:

$$T \text{ promedio (}^\circ\text{C)} = 22,5$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (cSt)} = 0,849$$

$$\text{Viscosidad cinemática, } \mu \text{ (m}^2\text{/s)} = 0,000000849$$

$$D_{t,int} \text{ (m)} = 0,0108$$

Calculamos Re

$$Re = 15481,75622 > 2100$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Donde

Conductividad térmica, K_f (W/mK)= 0,633

$$Pr = \frac{\mu/\rho}{K_f/(c_p \times \rho)}$$

c_p en Pa*s

Viscosidad dinámica, μ (cP)= 0,87

Viscosidad dinámica, μ (Pa·s)= 0,00087

Pr = 5,753270142

Calculamos:

Nu = 104,1237791

$$Nu = \frac{h_c \times D}{K_f}$$

$$h_{c,int} = \frac{Nu \times K_f}{D_{t,int}}$$

$h_{c,int}$ (W/m²K)= 6102,810389

Carcasa

T_c , promedio (°C)= 207,7

T_t , promedio (°C)= 22,5

T pared tubos es promedio de ambos fluidos (°C)= 115,1

Suponemos $T_{p,ext}$ tubos (°C)= 111,4

T_{media} entre $T_{p,ext}$ y T_{media} fluido (°C)= 159,55 T_m

Propiedades corriente a T_{pared} :

Fluido mezcla LER

T_m (°C)= 159,55

Viscosidad cinemática media, μ_c = 0,00000598 m²/s

Viscosidad dinámica media, μ_d = 0,00069 Pa·s

ρ (kg/m³)= 1160

C_p LER (kJ/kg/K)= 2,062 [sumatorio(%cabal_i* $c_{p,i}$)]

K_f (W/(m·K))= 1,26

Calcular la superficie total interior carcasa menos ocupado por tubos

S (m²)= 0,1377199

*Formula flujo másico

v (m/s)= 0,302

Hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo

$$Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu}$$

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3}$$

$$Re_D = 756,9390447$$

$$Pr = 1,129190476$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

$$Nu = 56,45586144$$

$$h_{c,ext} (W/m^2/K) = 4742,292361$$

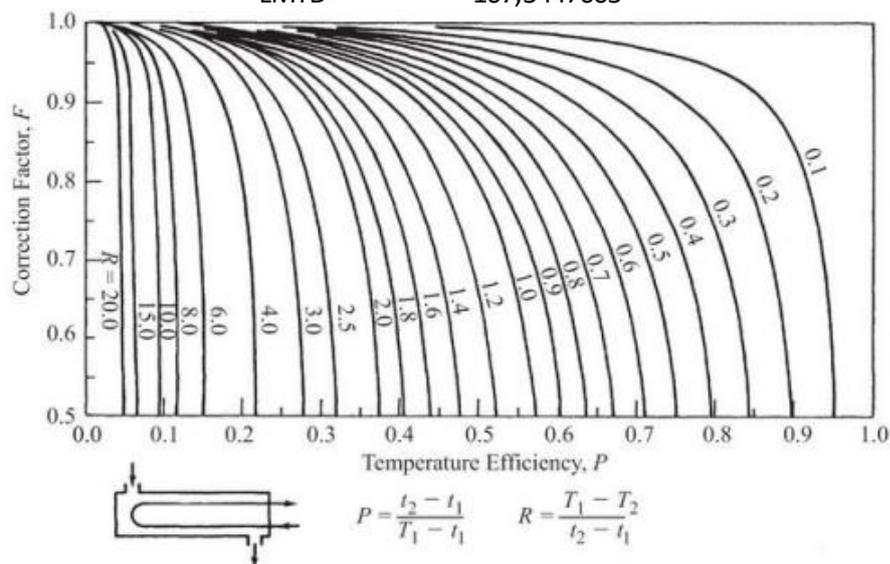
$$UxA = \frac{1}{R_{total}}$$

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}}$$

$$UxA = \frac{Q}{LMTD}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$LMTD = 107,5447605$$



$$P = 0,958379578$$

$$R = 0,014476$$

$$F = 0,975$$

$$LMTD' = 104,8561415$$

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

Incognita L

$$A_j = 2 \cdot N_{tubos} \cdot D_{t_j} \cdot L$$

Solver

L mínima de operación (m)= 7,564

L (m)= 9,08

20% seguridad

L tubos, utilizada (m)= 9

L tubo, doblado (m)= 4,5

L carcasa (m)= 5

11.7. Decantadores

11.7.1. Decantador 300

Para poder diseñar de manera correcta el decantador, es necesario conocer el tiempo requerido para la separación, que depende de las densidades de los líquidos que componen la mezcla y de la viscosidad de la fase continua.

A través de estos parámetros, se obtiene la ecuación 11.82, que se muestra a continuación, a través de la cual es posible calcular el tiempo necesario para separar los componentes, que en el caso del decantador D-300 son la epiclohidrina y el agua.

$$t_R = \frac{100 * \mu_A}{\rho_B - \rho_A}$$

Ecuación 11.82. Tiempo de residencia en el decantador

Dónde:

- μ_A : Viscosidad de la fase continua (Cp) = 1
- ρ_A : Densidad del líquido liviano (Kg/m³) = 997
- ρ_B : Densidad del líquido pesado (Kg/m³) = 1181,2

Una vez conocidos el valor de los parámetros, se calcula el tiempo de separación:

$$t_R = \frac{100 * \mu_A}{\rho_B - \rho_A} = \frac{100 * 1}{1181,2 - 997} = 0,543 \text{ h}$$

El tiempo de separación obtenido para el D-300, equivale a 0,543 h.

Una vez obtenido el valor correspondiente al tiempo de separación, es posible calcular el valor del volumen necesario del tanque a partir del caudal de entrada a éste y su tiempo de separación calculado anteriormente:

$$V = Q * t_R = 2,391 \text{ m}^3/\text{h} * 0,543 \text{ h} = 1,298 \text{ m}^3$$

El volumen de operación calculado en el decantador D-300 es de 1,298 m³, pero para asegurar el correcto funcionamiento del decantador es necesario sobredimensionarlo. Teniendo en cuenta que el tanque debería estar cerca del 95% de su capacidad, entonces el volumen final del decantador será:

$$V' = \frac{1,298}{0,95} = 1,367 \text{ m}^3$$

Una vez sobredimensionado, el volumen del decantador calculado es de 1,367 m³. Con este valor ya se pueden determinar las dimensiones del decantador.

Primeramente, sabemos que el volumen de un decantador viene dado por la ecuación 11.83:

$$V' = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

Ecuación 11.83. Volumen del decantador

Dónde:

- V': Volumen del decantador (m³)
- D: Diámetro del decantador (m)
- L: Longitud del decantador (m)

Estableciendo que la longitud tiene que ser 5 veces el diámetro (L/D=5), substituyendo esta relación en la ecuación anterior, se puede determinar el valor del diámetro (D) en función del volumen del decantador (V'):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V'}{5 * \pi}}$$

Ecuación 11.84. Diámetro del decantador

Dónde:

- V': Volumen del decantador (m³)
- D: Diámetro del decantador (m)

Insertando en la ecuación 11.84 el valor del volumen (V') previamente calculado, se determina el diámetro del decantador:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V'}{5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 1,367 \text{ m}^3}{5 * \pi}} = 0,703 \text{ m}$$

Obteniendo un valor del diámetro del decantador de 0,703 m.

Y posteriormente, aplicando la relación impuesta $L/D=5$, se aísla y calcula el valor de la longitud del decantador:

$$L = 5 * D = 5 * 0,703m = 3,517 m$$

Obteniendo así un valor de la longitud del decantador de 3,517 m.

Por último, para calcular el volumen total se debe sumar el volumen de los cabezales, que serán toriesféricos estándar.

$$V_{total} = V' + 2 * V_{toriesf} = 1,367 + 2 * 8,5 * 10^{-3} = 1,384 m^3$$

Una vez calculado el volumen total (V_{total}), se obtiene un valor de 1,384 m³.

El funcionamiento de los decantadores se analiza mediante los principios de mecánica de fluidos para que las líneas de desbordamiento sean suficientemente grandes para que la resistencia por fricción al flujo de los líquidos sea insignificante.

Por lo tanto, podemos definir los siguientes parámetros:

- ZA1: profundidad de la capa del líquido pesado
- ZB: profundidad de la capa del líquido ligero
- ZA2: altura sobre la base de la descarga del líquido pesado
- ZT: profundidad total del líquido en el tanque

Una vez calculadas las dimensiones del tanque, es momento de calcular la profundidad total del líquido en el tanque (Z_T). Ésta, se calcula multiplicando el diámetro del decantador por la fracción de volumen ocupado por el total del líquido, que es del 90%:

$$Z_T = 0,9 * D = 0,9 * 0,703 m = 0,633 m$$

Por lo tanto, la profundidad total del líquido en el tanque es de 0,633 m.

Seguidamente, es necesario calcular la altura a la que se encuentra la interfase entre los dos fluidos según la fracción volumétrica de cada componente presente en el caudal de entrada al tanque como muestran las ecuaciones 11.85 y 11.86:

$$Z_{A1} = \text{fracción volumétrica } A * Z_T$$

Ecuación 11.85. Profundidad de la capa del líquido pesado

$$Z_B = \text{fracción volumétrica } B * Z_T = Z_T - Z_{A1}$$

Ecuación 11.86. Profundidad de la capa del líquido ligero

Sustituyendo los parámetros de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$Z_{A1} = 0,936 * 0,633 = 0,592 \text{ m}$$

$$Z_B = 0,064 * 0,633 = 0,041 \text{ m}$$

Por último, queda calcular el valor de la altura sobre la base de la descarga del líquido pesado (Z_{A2}). Para hacerlo, se realiza un balance hidrostático según la siguiente ecuación:

$$Z_B * \rho_B + Z_{A1} * \rho_A = Z_{A2} * \rho_A * \rho_A$$

Aislando Z_{A2} de la ecuación x, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_{A2} = Z_{A1} + (Z_T - Z_{A1}) * \frac{\rho_A}{\rho_B}$$

Sustituyendo todos los parámetros anteriormente calculados en la ecuación anterior:

$$Z_{A2} = 0,592 + (0,633 - 0,592) * \frac{997}{1181,2} = 0,627 \text{ m}$$

11.7.2. Decantador 301

Para poder diseñar de manera correcta el decantador, es necesario conocer el tiempo requerido para la separación, que depende de las densidades de los líquidos que componen la mezcla y de la viscosidad de la fase continua. A través de estos parámetros, se obtiene la ecuación 11.87, que se muestra a continuación, a través de la cual es posible calcular el tiempo necesario para separar los componentes, que en el caso del decantador D-600 son la epiclorhidrina y el agua, por un lado, y el MIBK por el otro.

$$t_R = \frac{100 * \mu_A}{\rho_B - \rho_A}$$

Ecuación 11.87. Tiempo de residencia en el decantador

Dónde:

- μ_A : Viscosidad de la fase continua (Cp) = 0,545
- ρ_A : Densidad del líquido liviano (Kg/m³) = 802
- ρ_B : Densidad del líquido pesado (Kg/m³) = 1002

Una vez conocidos el valor de los parámetros, se calcula el tiempo de separación:

$$t_R = \frac{100 * \mu_A}{\rho_B - \rho_A} = \frac{100 * 0,545 \text{ Cp}}{1.002 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 802 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,273 \text{ h}$$

El tiempo de separación obtenido para el D-600, equivale a 0,273 h.

Una vez obtenido el valor correspondiente al tiempo de separación, es posible calcular el valor del volumen necesario del tanque a partir del caudal de entrada a éste y su tiempo de separación calculado anteriormente:

$$V = Q * t_R = 0,566 \text{ m}^3/\text{h} * 0,273 \text{ h} = 0,155 \text{ m}^3$$

El volumen de operación calculado en el decantador D-600 es de 0,155 m³, pero para asegurar el correcto funcionamiento del decantador es necesario sobredimensionarlo. Teniendo en cuenta que el tanque debería estar cerca del 95% de su capacidad, entonces el volumen final del decantador será:

$$V' = \frac{0,155 \text{ m}^3}{0,95} = 0,162 \text{ m}^3$$

Una vez sobredimensionado, el volumen del decantador calculado es de 0,162 m³. Con este valor ya se pueden determinar las dimensiones del decantador.

Primeramente, sabemos que el volumen de un decantador viene dado por la ecuación 11.88:

$$V' = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

Ecuación 11.88. Volumen del decantador

Dónde:

- V': Volumen del decantador (m³)
- D: Diámetro del decantador (m)
- L: Longitud del decantador (m)

Estableciendo que la longitud tiene que ser 5 veces el diámetro (L/D=5), substituyendo esta relación en la ecuación anterior, se puede determinar el valor del diámetro (D) en función del volumen del decantador (V'):

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V'}{5 * \pi}}$$

Dónde:

- V': Volumen del decantador (m³)
- D: Diámetro del decantador (m)

Insertando en el valor del volumen (V') previamente calculado, se determina el diámetro del decantador:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V'}{5 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,162 \text{ m}^3}{5 * \pi}} = 0,346 \text{ m}$$

Obteniendo un valor del diámetro del decantador de 0,346 m.

Y posteriormente, aplicando la relación impuesta L/D=5, se aísla y calcula el valor de la longitud del decantador:

$$L = 5 * D = 5 * 0,346 \text{ m} = 1,728 \text{ m}$$

Obteniendo así un valor de la longitud del decantador de 1,728 m.

Por último, para calcular el volumen total se debe sumar el volumen de los cabezales, que serán toriesféricos estándar.

$$V_{total} = V' + 2 * V_{toriesf} = 0,162 + 2 * 8,5 * 10^{-3} = 0,179 \text{ m}^3$$

Una vez calculado el volumen total (V_{total}), se obtiene un valor de 0,179 m³.

El funcionamiento de los decantadores se analiza mediante los principios de mecánica de fluidos para que las líneas de desbordamiento sean suficientemente grandes para que la resistencia por fricción al flujo de los líquidos sea insignificante.

Por lo tanto, podemos definir los siguientes parámetros:

- ZA1: profundidad de la capa del líquido pesado
- ZB: profundidad de la capa del líquido ligero
- ZA2: altura sobre la base de la descarga del líquido pesado
- ZT: profundidad total del líquido en el tanque

Una vez calculadas las dimensiones del tanque, es momento de calcular la profundidad total del líquido en el tanque (Z_T). Ésta, se calcula multiplicando el diámetro del decantador por la fracción de volumen ocupado por el total del líquido, que es del 90%:

$$Z_T = 0,9 * D = 0,9 * 0,346 \text{ m} = 0,311 \text{ m}$$

Por lo tanto, la profundidad total del líquido en el tanque es de 0,311 m.

Seguidamente, es necesario calcular la altura a la que se encuentra la interfase entre los dos fluidos según la fracción volumétrica de cada componente presente en el caudal de entrada al tanque como se muestra, al igual que en los casos anteriores:

$$Z_{A1} = \text{fracción volumétrica A} * Z_T$$

$$Z_B = \text{fracción volumétrica B} * Z_T = Z_T - Z_{A1}$$

Sustituyendo los parámetros de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$Z_{A1} = 0,9419 * 0,311m = 0,293 m$$

$$Z_B = 0,0581 * 0,311m = 0,018 m$$

Por último, queda calcular el valor de la altura sobre la base de la descarga del líquido pesado (Z_{A2}). Para hacerlo, se realiza un balance hidrostático:

$$Z_B * \rho_B + Z_{A1} * \rho_A = Z_{A2} * \rho_A * \rho_A$$

Aislando Z_{A2} , se obtiene:

$$Z_{A2} = Z_{A1} + (Z_T - Z_{A1}) * \frac{\rho_A}{\rho_B}$$

Sustituyendo todos los parámetros anteriormente calculados:

$$Z_{A2} = 0,293m + (0,311m - 0,293m) * \frac{802 \frac{kg}{m^3}}{1.002 \frac{kg}{m^3}} = 0,307 m$$

11.8. Evaporador EV-601

En la línea de proceso, después del coalescedor CO-601 y antes de la columna de destilación DC-602, se introduce un evaporador. Esto se debe a que el corriente de salida principal del coalescedor contiene dos tipos de fases líquidas diferentes, una fase acuosa y otra fase orgánica. Debido a que esta fase acuosa es considerablemente cercana a la orgánica, no se puede menospreciar. Por ello, se introduce el evaporador EV-601 con tal de eliminar gran parte de la fase acuosa, concentrando más el corriente orgánico y purificando más la resina epoxi líquida.

Para el diseño de este separador, se ha utilizado la herramienta de diseño y simulación *Aspen Hysys V10*, en el cual se ha especificado el corriente de entrada como una mezcla de fase orgánica (MIBK y LER) junto a la fase acuosa compuesta principalmente por agua, y epiclorhidrina disuelta.

Seguidamente se especifica el corriente de vapor, el corriente superior, y se simula el equipo hasta obtener los datos una vez converge:

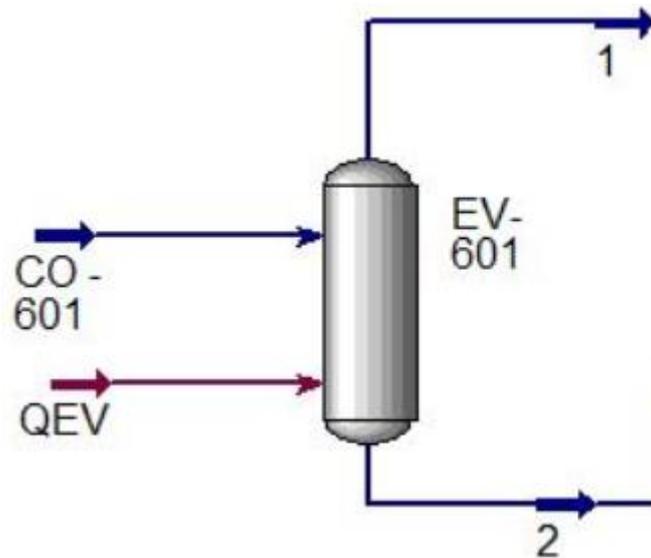


Figura 11.18. Diagrama EV-601

El corriente Qev se refiere al corriente energético necesario que se debe aportar para calentar el evaporador a la temperatura definida. Mientras que el corriente 2 es el corriente líquido que entra a la columna de destilación DC-602.

El evaporador se encontrará también referenciado como V-100, al igual que el corriente energético como Q-100.

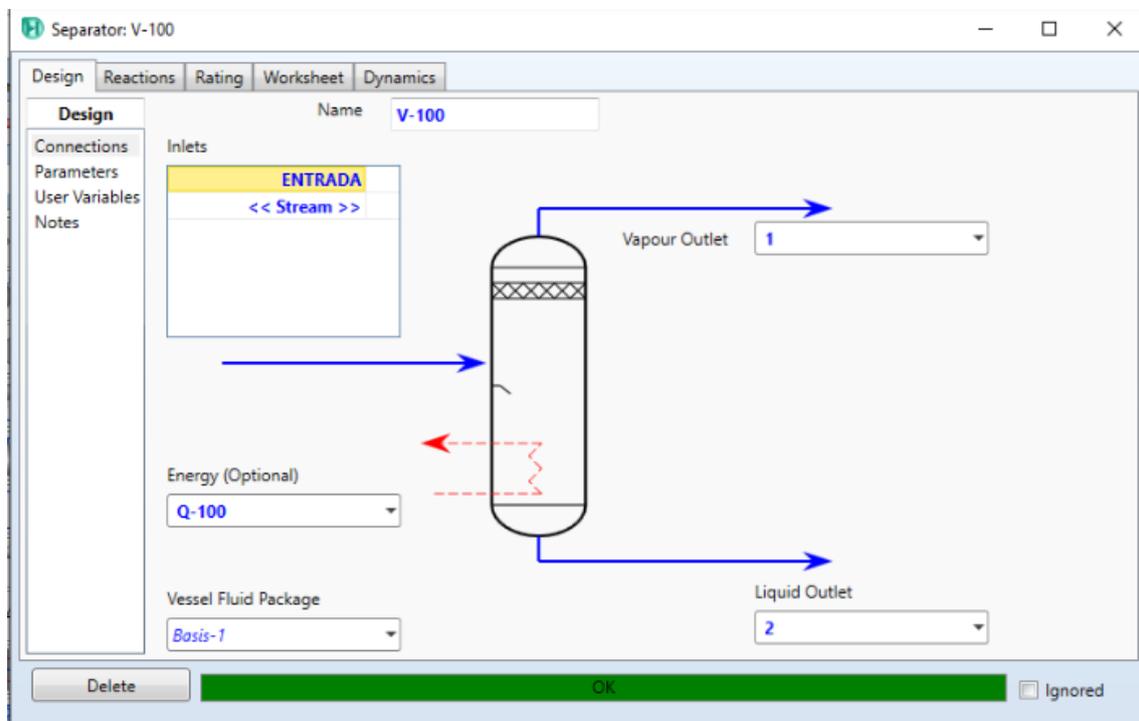


Figura 11.19. Menú principal del evaporado EV-601

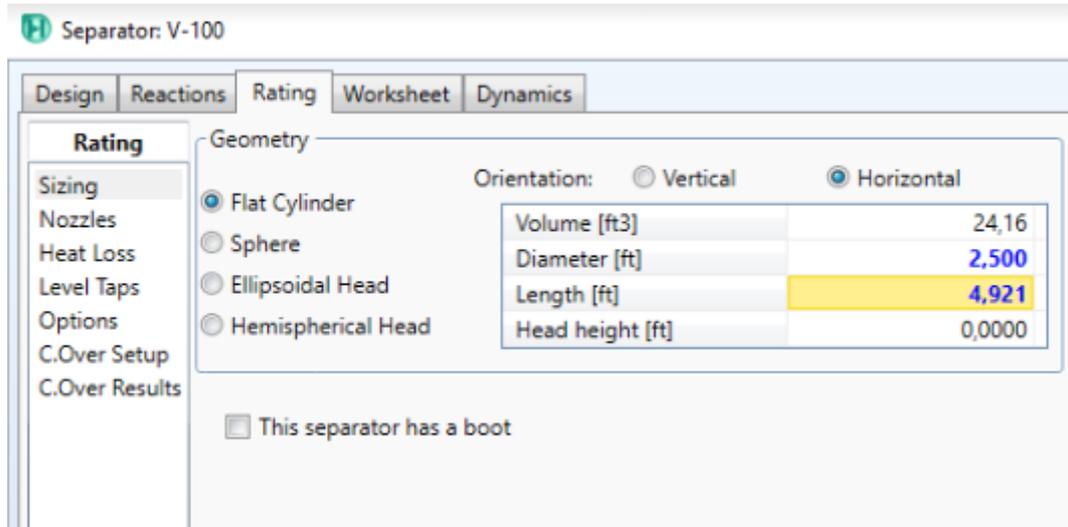


Figura 11.20. Dimensiones EV-601

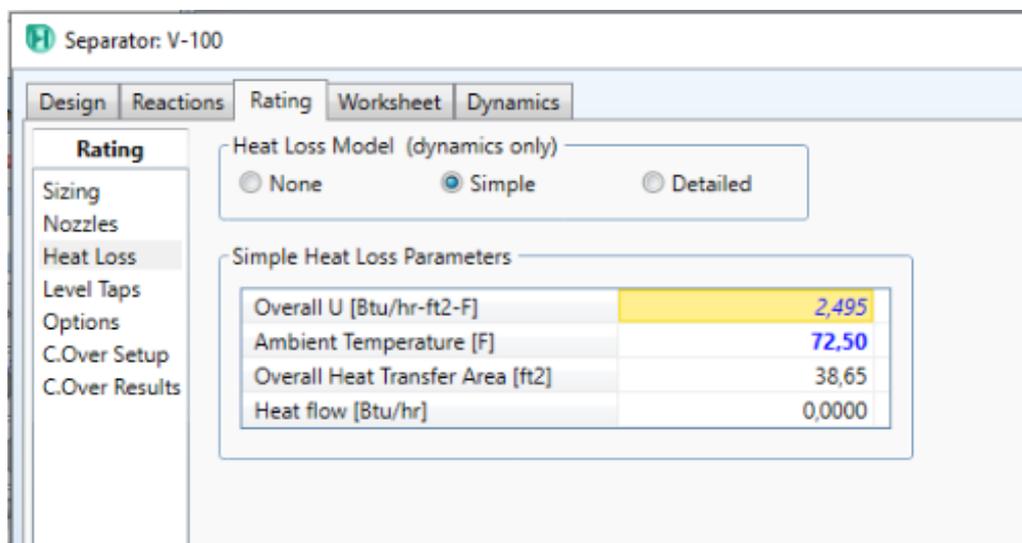


Figura 11.21. Parámetros de pérdidas de calor



Stream Name	ENTRADA	Liquid Phase	Aqueous Phase
Vapour / Phase Fraction	0,0000	0,8459	0,1541
Temperature [F]	176,0	176,0	176,0
Pressure [psia]	15,14	15,14	15,14
Molar Flow [lbmole/hr]	24,55	20,77	3,783
Mass Flow [lb/hr]	4846	4776	68,14
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	310,1	305,4	4,675
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-1,947e+005	-2,081e+005	-1,211e+005
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	-71,03	-86,91	16,19
Heat Flow [Btu/hr]	-4,779e+006	-4,321e+006	-4,579e+005
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	307,5	303,7	4,598
Fluid Package	Basis-7		
Utility Type			

Material Stream: ENTRADA

Worksheet	Attachments	Dynamics		Mole Fractions	Liquid Phase	Aqueous Phase
Conditions			Epichlohydrn	0,0017	0.0020	0.0000
Properties			H2O	0,1566	0.0030	1.0000
Composition			MIBK*	0,3834	0.4532	0.0000
Oil & Gas Feed			LER*	0,4583	0.5418	0.0000
Petroleum Assay						
K Value						
User Variables						
Notes						
Cost Parameters						
Normalized Yields						

Figura 11.22. Corriente de entrada al EV-601

Material Stream: 1

Worksheet	Attachments	Dynamics	Stream Name	1	Vapour Phase	Liquid Phase
Conditions			Vapour / Phase Fraction	1,0000	1,0000	0,0000
Properties			Temperature [F]	84,58	84,58	84,58
Composition			Pressure [psia]	0,4409	0,4409	0,4409
Oil & Gas Feed			Molar Flow [lbmole/hr]	8,435	8,435	0,0000
Petroleum Assay			Mass Flow [lb/hr]	529,1	529,1	0,0000
K Value			Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	44,24	44,24	0,0000
User Variables			Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-8,995e+004	-8,995e+004	-2,495e+005
Notes			Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	43,44	43,44	-129,0
Cost Parameters			Heat Flow [Btu/hr]	-7,587e+005	-7,587e+005	0,0000
Normalized Yields			Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	42,80	42,80	0,0000
			Fluid Package	Basis-1		
			Utility Type			

Material Stream: 1

Worksheet	Attachments	Dynamics		Mole Fractions	Vapour Phase	Liquid Phase
Conditions			Epichlohydrn	0,0018	0.0018	0.0016
Properties			H2O	0,4555	0.4555	0.0001
Composition			MIBK*	0,5426	0.5426	0.3001
Oil & Gas Feed			LER*	0,0000	0.0000	0.6982
Petroleum Assay						
K Value						
User Variables						
Notes						
Cost Parameters						
Normalized Yields						

Figura 11.23. Corriente de salida superior del evaporador EV-601

Material Stream: 2

Worksheet	Attachments	Dynamics		
Worksheet	Stream Name	2	Vapour Phase	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [F]	84,58	84,58	84,58
Composition	Pressure [psia]	0,4409	0,4409	0,4409
Oil & Gas Feed	Molar Flow [lbmole/hr]	16,12	0,0000	16,12
Petroleum Assay	Mass Flow [lb/hr]	4316	0,0000	4316
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	265,9	0,0000	265,9
User Variables	Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-2,495e+005	-8,995e+004	-2,495e+005
Notes	Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	-129,0	43,44	-129,0
Cost Parameters	Heat Flow [Btu/hr]	-4,020e+006	0,0000	-4,020e+006
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	264,9	0,0000	264,9
	Fluid Package	Basis-1		
	Utility Type			

Material Stream: 2

Worksheet	Attachments	Dynamics		
Worksheet	Mole Fractions	Vapour Phase	Liquid Phase	
Conditions	Epichlohydrn	0,0016	0,0018	0,0016
Properties	H2O	0,0001	0,4555	0,0001
Composition	MIBK*	0,3001	0,5426	0,3001
Oil & Gas Feed	LER*	0,6982	0,0000	0,6982
Petroleum Assay				
K Value				
User Variables				
Notes				

Figura 11.24. Corriente de salida inferior del evaporador EV-601

Energy Stream: QEV

Stream	Unit Ops	Dynamics	Stripchart	User Variables
Properties				
Stream Name	QEV			
Heat Flow [kJ/h]	4,800			
Ref. Temperature [C]	<empty>			
Utility Type				
Utility Mass Flow [kg/h]	<empty>			
OK				
Delete				
← →				

Figura 11.25. Corriente calorífico del evaporador EV-601

11.9. Diseño de la torre de destilación DC-602

En ResyTech se diseña unacolumna de destilación, específicamente la columna DC-602, con tal de poder separar la resina epoxi líquida (LER) del resto de corriente orgánico. Para ello, el diseño integro de dicha columna se diseña mediante el programa de simulaciones de procesos químicos y equipos *Aspen Hysys V10*.

En dicho programa, inicialmente se pide la introducción de todas las sustancias que participarán en el proceso. En nuestro caso, el corriente de alimentación a la torre consta de una mezcla del producto objetivo LER, disolvente orgánico MIBK, y unos porcentajes muy bajos de agua y epiclorhidrina. No todos los compuestos estan especificados en la base de datos del programa, en nuestro caso el LER. Por ello, se crea una entrada de componente, donde se le introduce el valor de tres propiedades del componente con tal que posteriormente cuando se escoja el pack termodinámico, este complete mediante relaciones los demás campos. En el caso del LER, al tener los datos de las correlaciones del programa SuperPro y aquellos que se obtienen de fichas técnicas del compuesto, se introduce:

- *Temperatura de ebullición= 384,05 °C*
- *Calor específico en fase líquida= 1,11 J/g/°C*
- *Peso molecular= 340,30 g/mol*

A continuación, se escoge un modelo termodinámico específico para el sistema, el cual consta de una base de datos oficial del cual se extraen las propiedades físicas y químicas de cada compuesto con tal de poder aplicar la simulación. El modelo escogido para dicha simulación es el pack Peng-Robinson modificado por Strijek y Verak (1986) (PRSV). Se ha escogido dichas correlaciones al seguir las recomendaciones de Eric Carlson en su artículo "*Don't gamble with physical properties for simulations*", Chem. Eng. Prog. October 1996, 35-46, además de la propia recomendación del simulador.

El método de Eric Carlson consta de un "árbol ramificado" desde el cual cada línea saliente de un punto presenta una pregunta, y dependiendo de la respuesta este te lleva a un paquete termodinámico específico. En este caso, corriente principal de LER y MIBK:

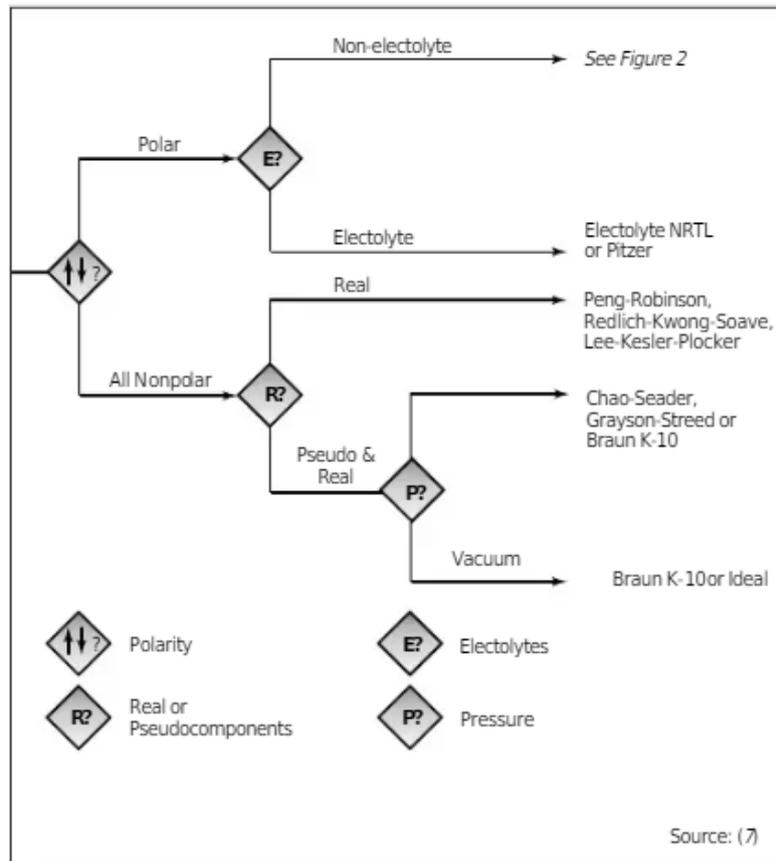


Figura 11.26. Recomendaciones Eric Carlson

Una vez establecido los pasos previos, se empieza a diseñar los equipos. Primeramente, se diseña el evaporador EV-601 con tal de eliminar toda la fase acuosa posible del sistema. Posteriormente se instala la columna de destilación. En dicha simulación se deben especificar algunos parámetros de diseño de la torre con tal de poder simular el resto de especificaciones del equipo. Se especifica:

- *Número de platos= 10*
- *Tipo de condensador= Total*
- *Entrada de alimento= 5º plato*

Los números de los platos se cuentan de forma descendente, es decir, el plato justo después del condensador es el número 1 y así bajando hasta el número 10, donde posteriormente se encontraría el reboiler.

- *Configuración del reboiler= Paso único*
- *Selección del tipo de reboiler= Reboiler regular Hysys*

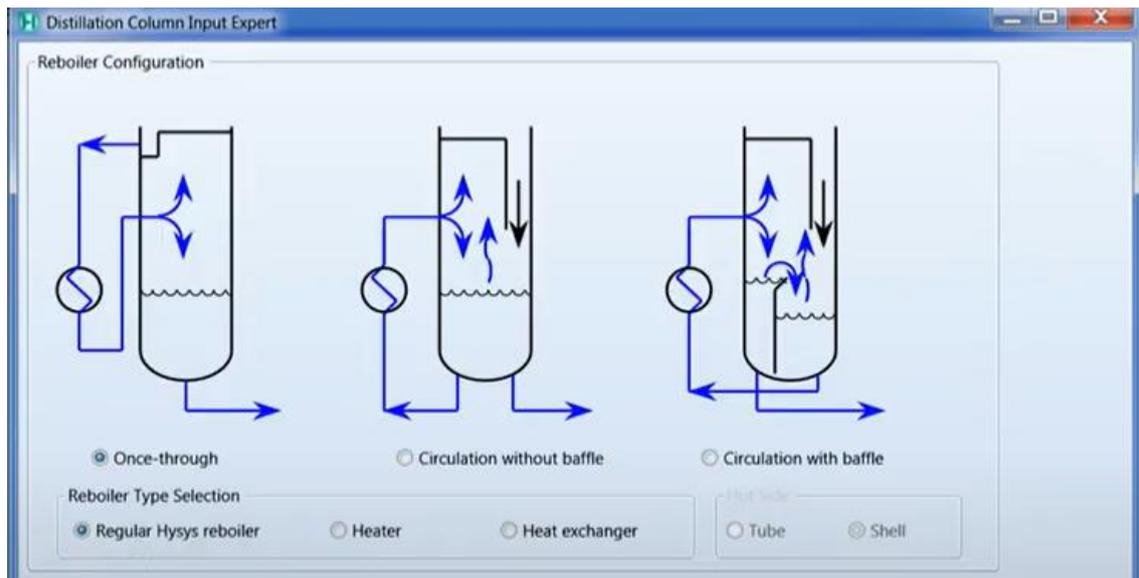


Figura 11.27. Configuración rehervidor/reboiler

- *Presión en el condensador= 101,3 kPa*
- *Presión en el reboiler= 101,3 kPa*
- *Relación de reflujo= 3,00*
- *Flujo liquido salida condensador= 2,207 kmol/h (Suma de los corrientes de entrada de MIBK, agua y epiclorhidrina).*

Se introduce la suma el valor de los corrientes de entrada de los componentes no deseados como corriente condensado debido a que buscamos que la operación separe el producto objetivo del resto de componentes.

Una vez introducidos todos estos valores, se inicial la simulación de la columna hasta que el programa converge mostrando los valores finales del equipo posible para llevar acabo dicha operación. Una vez obtenido los valores de la columna, se discuten si estos resultados tienen sentido y cumplen los valores típicos.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de la simulación, estos resultados embarcan el total de la columna, con rehervidor y condensador:

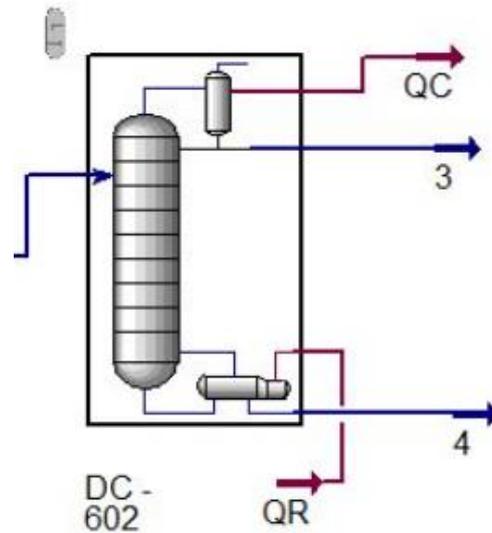


Figura 11.28. Columna de destilación DC-602

Comentar que en dicha figura el corriente de entrada a la columna (Línea azul izquierda) hace referencia al corriente de salida del evaporador y se representará en los resultados como corriente 2.

El corriente 3 es el corriente de condensados. Y el corriente 4 hace referencia a la salida del reboiler, compuesto por LER.

Q_r es el valor de calor necesario que se debe aportar al reboiler para su operación. Q_c a su misma vez es el valor energético calorífico que se debe captar para poder efectuar el proceso de condensación.

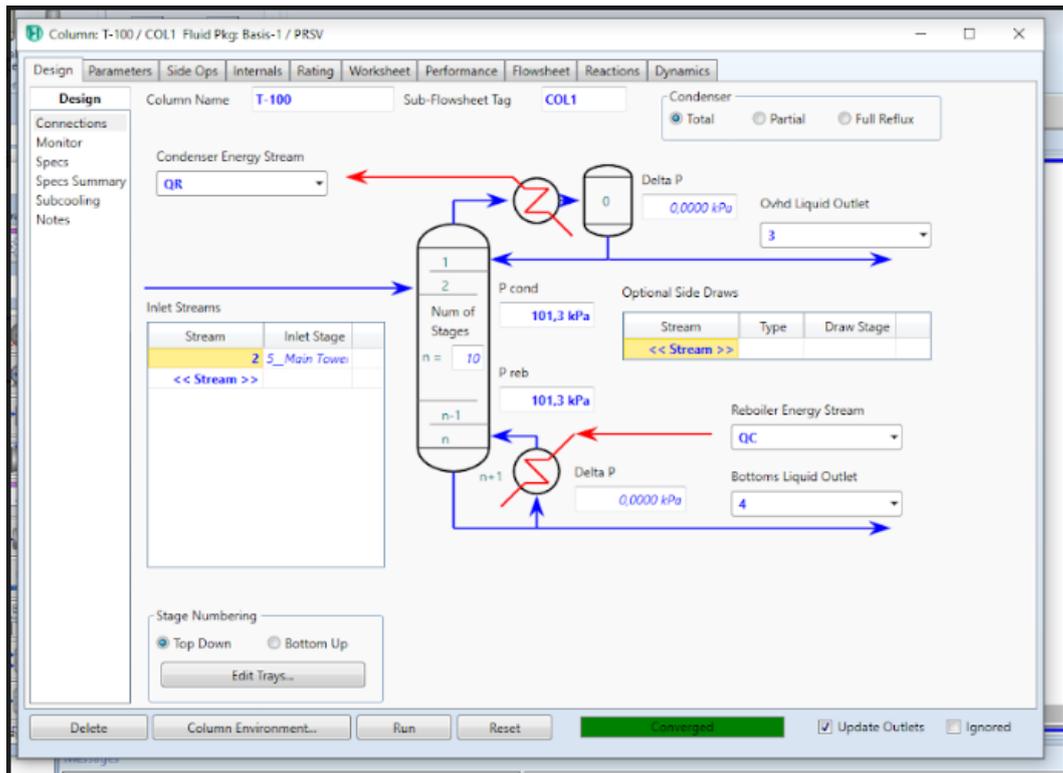
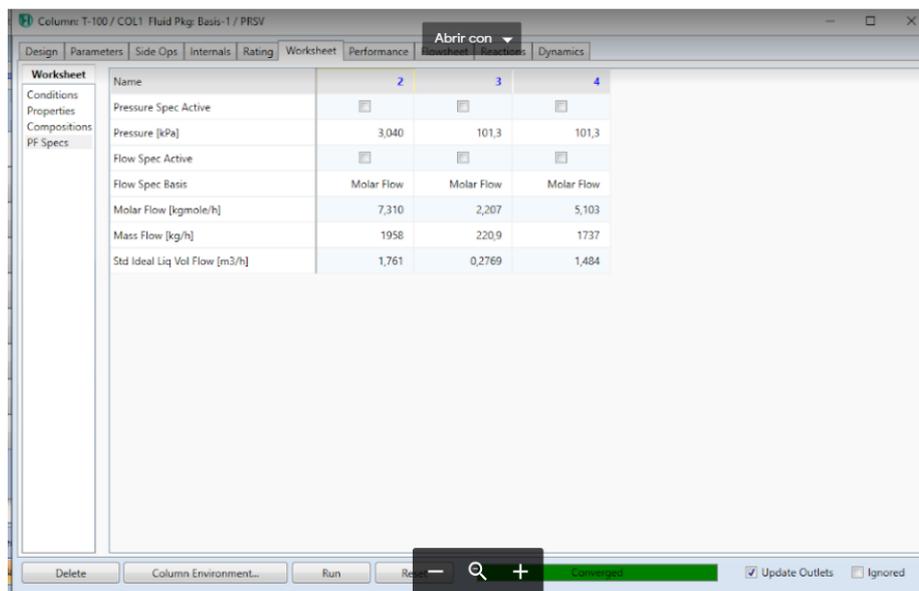


Figura 11.29. Menú de especificaciones de DC-602

Importante comentar las diferencias de nombre de la columna, así como los corrientes energéticas del condensador y reboiler. Estos últimos, fueron cambiados entre sí como se puede ver en la figura anterior, pero se olvidó volver a capturar la imagen de este menú corregido. Lo mismo pasa con el nombre de la torre, en este aparece como T100, nombre por defecto del programa, mientras que en el esquema principal se ha cambiado. Puede haber algún error similar en alguna de las figuras siguientes, aunque se han intentado corregir todas ellas.



Name	2	3	4
Pressure Spec Active	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pressure [kPa]	3,040	101,3	101,3
Flow Spec Active	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flow Spec Basis	Molar Flow	Molar Flow	Molar Flow
Molar Flow [kgmole/h]	7,310	2,207	5,103
Mass Flow [kg/h]	1958	220,9	1737
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,761	0,2769	1,484

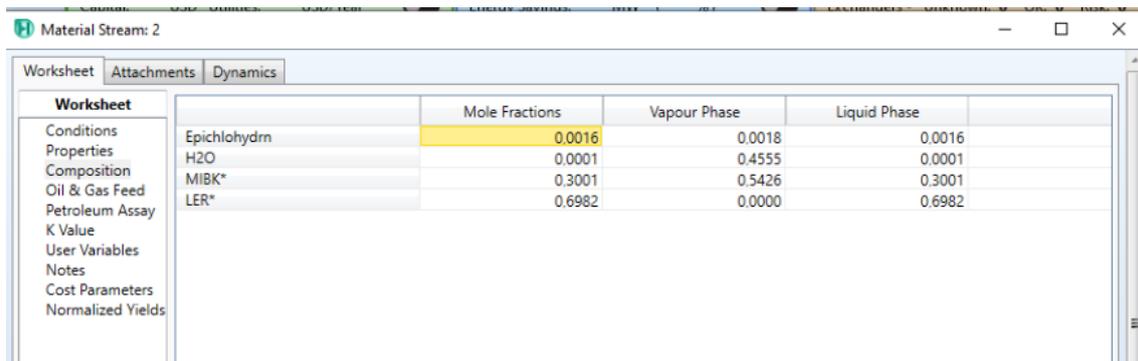
Name	2	3	4
Pressure Spec Active	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pressure [kPa]	3,040	101,3	101,3
Flow Spec Active	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flow Spec Basis	Molar Flow	Molar Flow	Molar Flow
Molar Flow [kgmole/h]	7,310	2,207	5,103
Mass Flow [kg/h]	1958	220,9	1737
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,761	0,2769	1,484

Figura 11.30. Propiedades de los corrientes

La temperatura de los corrientes, aunque no aparezca directamente en dicha imagen, son de:

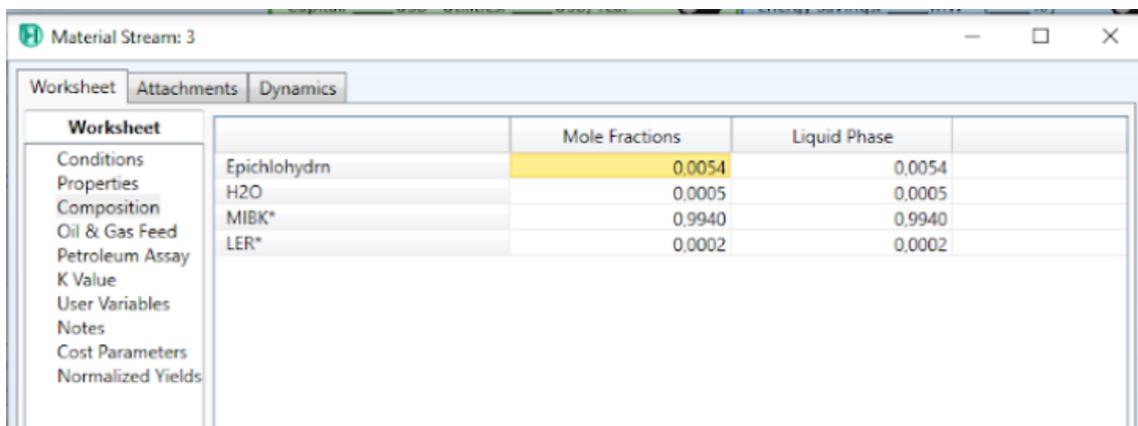
Name	2	3	4
Temperature [°C]	29,9	114,1	330,0

Figura 11.31. Temperatura de los corrientes DC-602



Worksheet	Mole Fractions	Vapour Phase	Liquid Phase
Epichlohydrn	0.0016	0.0018	0.0016
H2O	0.0001	0.4555	0.0001
MIBK*	0.3001	0.5426	0.3001
LER*	0.6982	0.0000	0.6982

Figura 11.32. Composición corriente entrada DC-602 (2)



Worksheet	Mole Fractions	Liquid Phase
Epichlohydrn	0.0054	0.0054
H2O	0.0005	0.0005
MIBK*	0.9940	0.9940
LER*	0.0002	0.0002

Figura 11.33. Composición corriente salida condensador DC-602 (3)

Material Stream: 4

Worksheet Attachments Dynamics

Worksheet	Mole Fractions	Liquid Phase
Conditions	Epichlohydrn	0.0000
Properties	H2O	0.0000
Composition	MIBK*	0.0000
Oil & Gas Feed	LER*	1.0000
Petroleum Assay		
K Value		
User Variables		
Notes		
Cost Parameters		
Normalized Yields		

Figura 11.34. Composición corriente salida reboiler DC-602 (4)

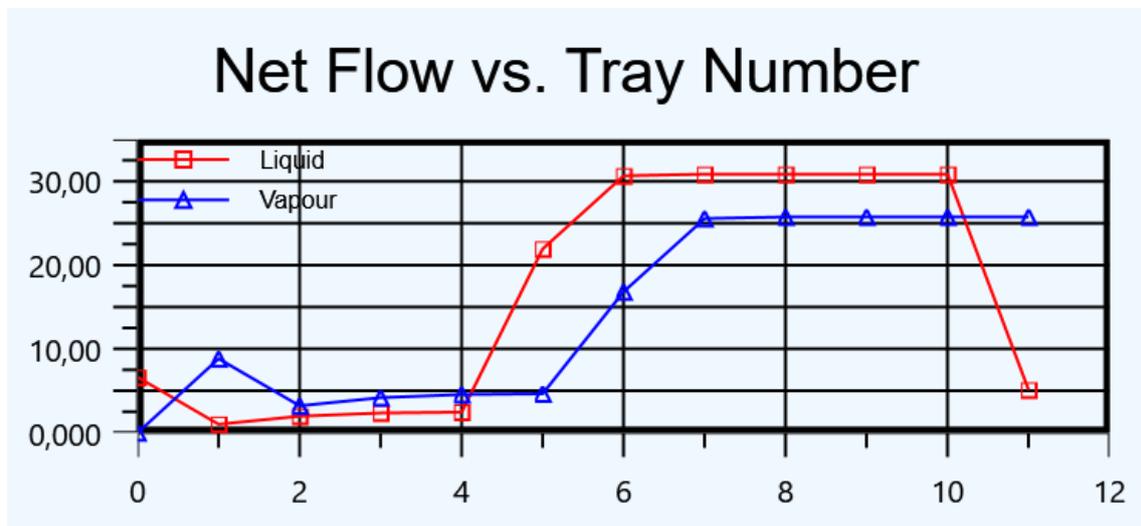


Figura 11.35. Flujo neto por cada plato

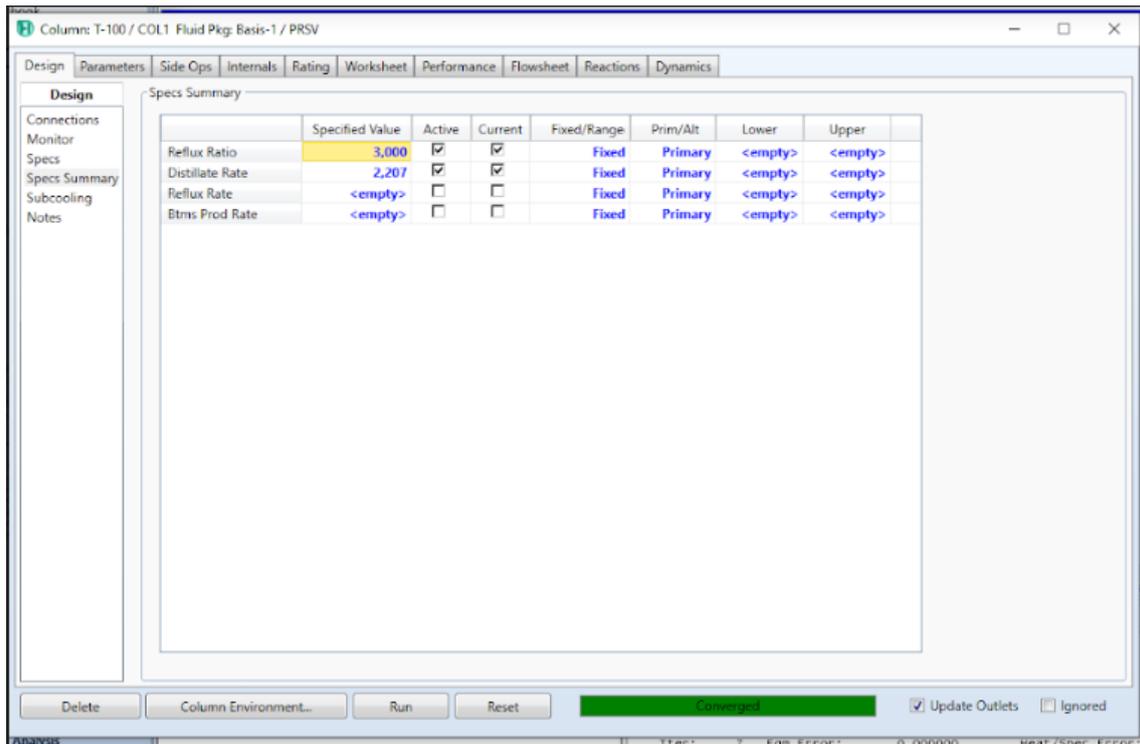


Figura 11.36. Relación de reflujo y flujo de destilado

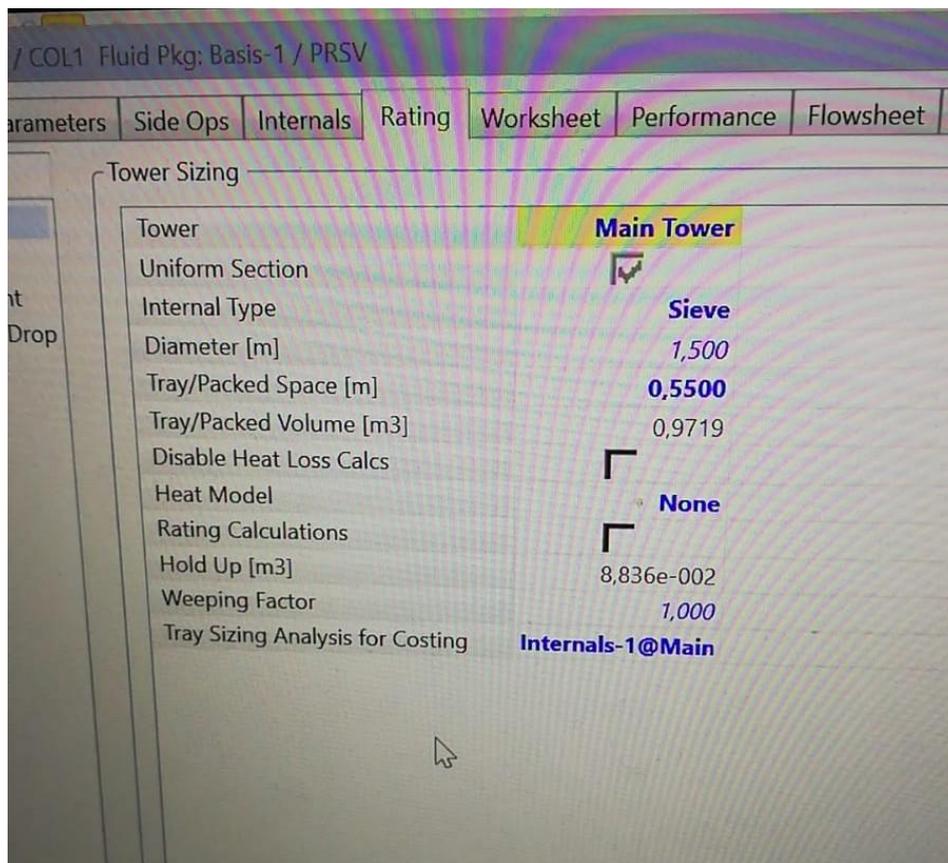


Figura 11.37. Medidas DC-602

Column: T-100 / COL1 Fluid Pkg: Basis-1 / PRSV

Vessel Dynamic Specifications			
Vessel	Reboiler	Condenser	
Diameter [m]	1,193	1,193	
Height [m]	1,789	1,789	
Volume [m3]	2,000	2,000	
Liq Vol Percent [%]	50,00	50,00	
Level Calculator	Horizontal cylinder	Horizontal cylinder	
Fraction Calculator	Use levels and nozzles	Use levels and nozzles	
Vessel Delta P [kPa]	0,0000	0,0000	
Fixed Vessel P Spec [kPa]	101,3	101,3	
Fixed P Spec Active	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 11.38. Dimensiones del condensador y reboiler

Energy Stream: QR

Properties	
Stream Name	QR
Heat Flow [kJ/h]	4,389e+005
Ref. Temperature [C]	<empty>
Utility Type	
Utility Mass Flow [kg/h]	<empty>

OK

Delete

Figura 11.39. Corriente de calor aportada al reboiler

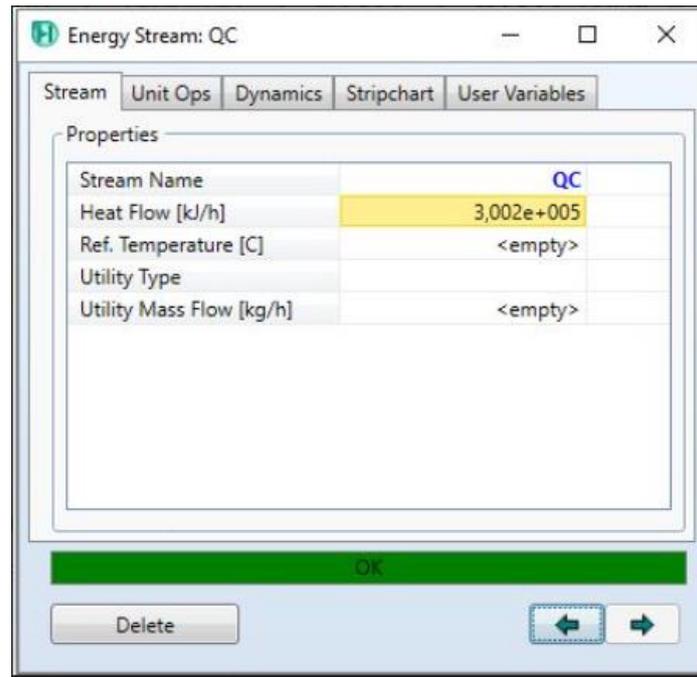


Figura 11.40. Corriente de calor desprendida en el condensador

11.9.1. Cálculo del fluido refrigerador para el condensador

Una vez obtenido el valor de flujo de calor del condensador de la columna DC-602, se procede a calcular el corriente de fluido refrigerante necesario para condensar dicho corriente.

Al tratarse de una temperatura de operación del condensador de 114 °C, se utiliza agua como fluido refrigerante.

$$Q = m * Cp * \Delta T, \quad 83,46 \frac{kJ}{h} = m * 4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * (45 - 20)^\circ C$$

Ecuación 11.89. Calor intercambiado en el condensador

Obteniendo un valor de caudal másico de agua de 0,80 kg/s, donde mediante la densidad y el paso de segundos a horas se obtiene un flujo volumétrico de 2,88 m³/h de refrigerante.

Tabla 11.17. Datos y cálculo de agua refrigerante para el condensador

Condensador	
Q condensador (kW)=	-83,46
Q condensador (kJ/h)=	-300200
Q condensador (kJ/s)=	83,46
Cp (kJ/(kg·°C))=	4,19
T salida (°C)=	45,00
T entrada (°C)=	20,00
ΔT =	25,00
m (kg/s)=	0,80
densidad ρ (kg/m ³)=	998
m (m ³ /s)=	7,99E-04
m (m ³ /h)=	2,88

11.9.2. Cálculo del fluido calefactor para el reboiler

Se utilizará aceite térmico SIL TERMIC del productor Tecmasol, el cual es capaz de soportar altas temperaturas. Se calculará de la misma manera que se ha calculado el corriente de agua del condensador, pero con los parámetros característicos del reboiler:

$$-122.01 \frac{kJ}{s} = m * 2,37 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * (350 - 300)^\circ C$$

Obteniendo un corriente de aceite térmico de 4113,42 kg/h → 4,84 m³/h.

Tabla 11.18. Datos y cálculo del aceite térmico para el reboiler

Reboiler (Rehervidor)	
Q reboiled (kW)=	122,01
Q reboiled (kJ/h)=	438900
Q aceite (kJ/s)=	-122,01
Cp aceite (kJ/(kg °C))	2,37
T salida (°C)=	300
T entrada (°C)=	340
ΔT =	-40
m (kg/s)=	1,143
m (kg/h)=	4113,42
densidad ρ (g/cm ³)=	0,85
densidad ρ (kg/m ³)=	850
m (m ³ /h)=	4,84

11.10. Diseño de bombas

Las bombas son los dispositivos encargados de impulsar y suministrar energía a los fluidos con la intención de que estos lleguen hasta la entrada del siguiente equipo superando, de esta forma, pérdidas de carga y cambios alturas en los diferentes tramos.

Todos los tipos de bombas cumplen una serie de características:

- Requieren un mantenimiento semanal y en las paradas anuales.
- Han de ser colocadas en una elevación especial de hormigón para evitar entradas de líquido en caso de inundación.
- Las bombas utilizadas están hechas de acero inoxidable.
- Las bombas se distribuyen con una serie de válvulas.
- del elemento motor.

Una vez calculadas las tuberías, es necesario encontrar una manera de seleccionar las bombas para asegurar que el fluido pueda ser transportado a los equipos específicos. Para ello, es necesario calcular las pérdidas por fricción, la carga total y el NPSH disponible.

Las pérdidas por fricción tienen una relación directa con el Reynolds, es decir, que mientras mayor sea la velocidad, mayor será la viscosidad y la densidad. Dependiendo de este Reynolds podemos diferenciar entre circulación en régimen laminar, de transición o turbulento.

Se diferencian pérdidas por fricción en tramos rectos y en accidentes.

- Pérdida de fricción en tramos rectos:

$$e_{vrectes} = 4f \cdot \frac{v^2 \cdot L}{2 \cdot D}$$

Dónde:

- e_v : pérdidas por fricción (J/kg)
- v : velocidad de circulación (m/s)
- D : diámetro de la tubería (m)
- L : Longitud del tramo (m)
- f : factor de fricción

Para determinar el factor de fricción se utiliza el diagrama Moody, que se muestra a continuación:

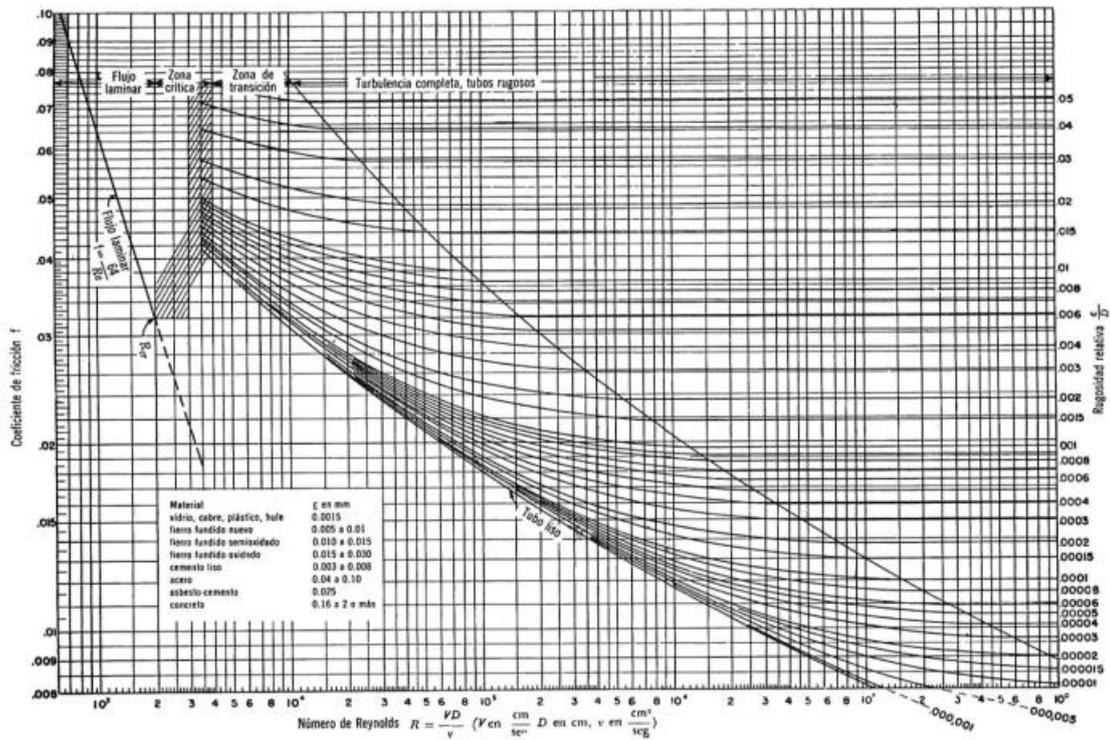


Figura 11.41. Diagrama de Moody.

- Pérdida de fricción de los accesorios:

$$e_{v acc} = K \cdot \frac{v^2}{2}$$

Dónde:

- K: parámetro K
- v: velocidad de circulación

Para determinar las pérdidas por fricción de los accesorios se utiliza el parámetro K, que tiene un valor diferente dependiendo del accidente al cual haga referencia. Estos valores se pueden observar en la figura XXX, que se muestra a continuación:

ACCIDENT	K
Válvula de seient	
oberta	9,0
¼ oberta	13,0
½ oberta	36,0
¾ oberta	112,0
Válvula angular oberta	2,0
Válvula de retenció (oberta)	
de chamera (frontissa)	2,0
de bola	70,0
de disc	10,0
Cabalimetres mecànics	
de disc	7,0
de pistó	15,0
rotatori	10,0
de turbina	6,0
Canvi de diàmetre	
estretament	“(b)
eixamplament	“(b)

$$e_{v\text{ acc}} = K \frac{v^2}{2}$$

Equació 199

Figura 73:
Valor del
coeficient
K per a
diferents
accessoris

ACCIDENT	K
Entrada/sortida circuit	
Entrada encançada	0,78
Entrada cantells vius	0,50
Entrada arrodonada	0,04
Sortida encançada	1,00
Sortida cantells vius	1,00
Sortida arrodonada	1,00
Colzes/ Unions	
Colze de 45° standard	0,35
Colze de 45° gran curvatura	0,20
Colze de 90° standard	0,75
Colze de 90° gran curvatura	0,45
Colze de 90° petita curvatura	1,3
Colze de 180°	1,5
T standard ús com a colze	1,0
T standard amb bifurcació tancada	0,4
T standard amb divisió de cabal	1,0 (a)
Unió rosçada	0,04
Maneguet d'unió	0,04
Válvula comporta	
oberta	0,17
¼ oberta	0,90
½ oberta	4,5
¾ oberta	24,0
Válvula de diafragma	
oberta	2,3
¼ oberta	2,6
½ oberta	4,3
¾ oberta	21,0

Figura 11.42. Valor del coeficiente K para los diferentes accesorios.

- Pérdidas por fricción totales

Se calculan a través de la suma de las pérdidas por fricción en tramos rectos y en accidentes.

$$e_v = e_{v\text{ rectes}} + e_{v\text{ acc}}$$

Una vez calculadas las pérdidas por fricción, es necesario realizar un Balance de Energía Mecánica (BEM) entre los dos puntos de la planta con la intención de determinar la potencia necesaria para que el fluido pueda ser transportado.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_2^2}{\alpha} - \frac{v_1^2}{\alpha} \right) = \hat{w} - e_v$$

Dónde:

- ΔP (Pa): diferencia de presión entre los dos puntos establecidos.
- ρ (kg/m³): densidad del fluido.
- g (m/s²): aceleración de la gravedad.
- z_1 y z_2 (m): altura del líquido en los puntos establecidos.
- v_1 y v_2 (m/s): velocidad inicial y final del fluido.
- α : factor de corrección de la energía cinética (valor de 0.5 para régimen turbulento y de 1 para régimen laminar).
- \hat{w} (J/kg): trabajo por unidad de masa.
- e_v (J/kg): pérdidas de trabajo por fricción.

El cálculo de las pérdidas por fricción también permite calcular el trabajo de la bomba. Para ello es necesario fijar el incremento de presión al valor deseado y utilizar la siguiente:

$$w = \frac{\Delta P}{\rho} + g * \Delta z + \frac{1}{2} * \left(\frac{v_2^2}{\alpha} - \frac{v_1^2}{\alpha} \right) + e_v$$

Para calcular la potencia teórica de la bomba, se utiliza la siguiente ecuación:

$$W = w \cdot Q_m$$

Dónde el parámetro W hace referencia al trabajo teórico realizado por la bomba expresado en vatios (W) y Q_m al caudal másico impulsado expresado en kg/s.

Finalmente, para saber el valor de la potencia real de la bomba hay que tener en cuenta el rendimiento(r):

$$Wr = \frac{W}{r}$$

Por último, para calcular el NPSH disponible, que es una medida de cuán cerca está el fluido de la cavitación, fenómeno producido en el tramo de aspiración que puede dar lugar a la formación y explosión repentina de burbujas de vapor. Para evitarlo, el NPSH disponible tiene que ser mayor al requerido. Para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$NPSH_{disp} = h_a - \frac{P_v}{g * \rho}$$

Dónde:

- h_a: carga de aspiración [m].
- P_v: presión de vapor [Pa].

Por lo tanto, es necesario calcular la carga de aspiración:

$$h_a = \Delta z + \frac{1}{g} * \left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2 * \alpha} - e_{v_{aspiración}} \right)$$

Dónde:

- P₁: presión en el punto inicial [Pa].
- Δz: diferencia de altura entre punto inicial y final del tramo[m].
- v₁: velocidad del fluido el punto inicial del tramo [Pa].
- e_{v_{asp}}: pérdidas de energía del tramo de aspiración [J/kg].

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo referente a la bomba P-101-A-1, que conecta el camión cisterna y los tanques de almacenamiento de epiclorhidrina T-101,102,103 y 104.

11.11. Diseño de compresores

Un compresor es un dispositivo capaz de absorber el aire, comprimirlo, acumularlo y dejarlo salir a presión. Tiene un objetivo similar al de las bombas, que consiste en asegurar que las condiciones de entrada del fluido al equipo sean las adecuadas.

Para elegir el compresor adecuado, es necesario tener en cuenta el caudal de gas, la presión de entrada, la presión de salida deseada y la potencia máxima del compresor.

El consumo se puede calcular a través de las siguientes ecuaciones:

$$w = P_1 * v_1 * \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Dónde:

- w: trabajo realizado [J/kg].
- P₁: presión de entrada al compresor [Pa].
- P₂: presión de salida del compresor [Pa].
- V₁: volumen específico del gas a la entrada del compresor [m³/kg].

De igual manera que para las bombas, para calcular el consumo teórico:

$$W = w * Q_m$$

Dónde:

- W: consumo teórico compresor [W].
- Q_m: caudal másico de gas[kg/s].

Teniendo en cuenta el rendimiento del compresor (r), es posible calcular el consumo real:

$$Wr = \frac{W}{r}$$

-

11.12. Diseño de los equipos de servicio

11.12.1. Caldera de vapor CV-700

Los parámetros claves para diseñar y escoger una caldera de cualquier tipo son la producción térmica necesaria y el caudal de fluido refrigerante o calefactor necesario. Para ello, se ha recopilado todos aquellos equipos que precisen de un corriente de vapor con tal de que aporte dicha calor y pueda calentar el/los corrientes objetivo.

Tabla 11.19. Equipos de la planta ResyTech que utilizan un corriente de vapor

Equipos que precisan Vapor	
	kg/h necesarios
IC-200	10747,23
IC-500	4032,65
TOTAL	14779,88

Como se puede apreciar en la tabla, precisamos de un corriente total de vapor de 14779,88 kg/h. Se deberá escoger una caldera la cual pueda producir un corriente superior de vapor al calculado, debido a que debe tener un factor de seguridad el cual nos asegure que, para posibles desviaciones de la operación normal, supla esa variación.

No solo se determina el corriente masico de vapor total necesario, sino que también se debe calcular a partir de este corriente el calor que se debe aportar con tal de poder llevar ese corriente a la temperatura deseada. Se han diseñado los equipos que utilizan dicho corriente de vapor de tal manera que haya un salto térmico de 55 °C aproximadamente. A continuación se buscará este valor de Q necesario:

$$Q_{necesario} = m * C_p * \Delta T = 14779,88 \frac{kg}{h} * 2,01 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * (170 - 115)^\circ C$$

$$Q_{necesario} = 1633916 \frac{kJ}{h} = 453,87 kW$$

Ecuación 11.90. Aportación de calor necesaria de la caldera de vapor

La energía calorífica necesaria para provocar el salto térmico del vapor es la misma energía térmica que debe producir la caldera con tal de aportarla al corriente de vapor. Para ello, se busca una caldera que cumpla con dichas especificaciones, siendo así que se escoge la caldera de vapor Bosch modelo UL-S, capaz de producir corrientes de vapor en un rango de 1.250 kg/h a 28.000 kg/h y suplir esta demanda energética. Para ello, dicha caldera utiliza como combustible Gas, aceite, biogás, bioaceite y/o hidrógeno. En

el caso de la caldera instalada en ResyTech, se utilizará como combustible el gas natural por su facilidad de obtención y coste medio-bajo. Este se meterá en la cámara de combustión y desprenderá dicho calor que se transmitirá a los tubos de paso del vapor. Para calcular el combustible necesario de gas natural que se consume, se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{gas} = \frac{\text{valor calorífico de la caldera}}{\text{valor calorífico del gas natural} \cdot \text{eficiencia térmica de la caldera}}$$

Ecuación 11.91. Consumo de combustible gas para una caldera

C_{gas} es referido al consumo de gas natural necesario para conseguir dicho valor calorífico de la caldera, obteniendo así un consumo de:

$$C_{gas\ natural} = \frac{1633916\ kJ/h}{48,01\ \frac{kJ}{m^3} * 0.97} = 9,75\ m^3/h$$

Las dimensiones y especificaciones de la caldera se encuentran en su apartado respectivo del capítulo *Equipos*.

11.12.2. Caldera de aceite CT-700

En el caso de la caldera de aceite CT-700, el único equipo que debe alimentar es el reboiler de la columna de destilación DC-602.

Ecuación 11.92. Equipos que utilizan aceite térmico

Equipos que precisan aceite térmico	
	kg/h necesarios
Rehervidor	4113,42
TOTAL	4113,42
kJ/h Caldera	439251
kW Caldera	122,01

Se escoge la caldera de WTÖ, una caldera horizontal de tres pasos de humos, que al igual que la caldera de vapor CV-700, consumirá como combustible gas natural. A continuación se calcula el consumo de dicho combustible:

Ecuación 11.93. Consumo gas natural CT-700

$$C_{gas\ natural} = \frac{439251\ \frac{kJ}{h}}{48,01\ \frac{kJ}{m^3} * 0.98} = 2,620\ \frac{m^3}{h}$$

11.12.3. Torre de refrigeración TR-700

En cuanto a la torre de refrigeración, se ha encontrado el valor total de agua utilizada por todos los equipos:

Tabla 11.20. Equipos que precisan agua de refrigeración

Equipos refrigerados que precisan agua	
	kg/h necesarios
R-200/201	23451,79
R-300/301	99947,87
R-500/501	4945,97
IC-201	208752,23
IC-300	24967,92
IC-400	20991,40
IC-600	31734,49
IC-601	17261,13
Condensador	2870,90
TOTAL	434924
m ³ /h	435,80
Potencia refrigerante necesaria	
kJ/h Torre ref.	18205907
kW Torre ref.	5057

En este caso se ha calculado tanto el corriente volumétrico como la potencia frigorífica necesaria para llevarla de 25 °C a 20 °C. Este se refrigera por aire, y mediante las anteriores dos especificaciones se elige el modelo de torre que más convenga.

En el caso de ResyTech se utiliza la torre PME 6203E K19, donde las especificaciones del equipo se pueden encontrar en el capítulo de *Equipos*.

Se calcula la cantidad de cloro ha añadir conociendo que la concentración ideal para eliminar parásitos y bacterias es de 20 mg/L, por lo que teniendo un corriente total de 434924 L/h, se encuentra una cantidad de consumo anual de 77 kg de cloro 98%.