



PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ASPIRINA (API)

Trabajo Final de Grado

Tutor: Marc Peris

Rubén Aleu

Alex Espinoza

Cristina Sánchez

Marta Sobocińska

Junhong Ye



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA
ESCOLA D'ENGINYERIA
GRADO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Año académico 2018/2019

CAPÍTULO XI: MANUAL DE CÁLCULOS



PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ASPIRINA (API)

Trabajo Final de Grado

Tutor: Marc Peris

Rubén Aleu

Alex Espinoza

Cristina Sánchez

Marta Sobocińska

Junhong Ye



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA
ESCOLA D'ENGINYERIA
GRADO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Año académico 2018/2019

ÍNDICE

11. Manual de cálculos	1
11.1. Tanque de almacenamiento y tanques pulmón	1
11.1.1. Diseño mecánico	1
11.1.1.1. Tanques a presión atmosférica: API	1
11.1.1.2. Tanques a presión superior a la atmosférica: ASME	4
11.1.1.3. Cálculo de la presión máxima de cuerpo cilíndrico	8
11.1.1.4. Cálculo de la presión máxima de cuerpo cabezal	8
11.1.2. Cálculo de las dimensiones de los tanques	8
11.1.2.1. Cálculo de la altura del tanque	8
11.1.2.2. Cálculo del volumen del equipo	10
11.1.2.3. Cálculo del peso del equipo	11
11.1.3. Tanques de almacenamiento	12
11.1.3.1. Tanque de almacenamiento de fenol T-101	13
11.1.3.2. Tanque de almacenamiento de NaOH S-106	19
11.1.3.3. Tanque de almacenamiento de CO ₂ T-107	21
11.1.3.4. Tanque de almacenamiento de H ₂ SO ₄ 60% T-103	22
11.1.3.5. Tanque de almacenamiento de anhídrido acético T-104	23
11.1.3.6. Tanque de almacenamiento de óxido de calcio S-105	25
11.1.3.7. Tanques de agua desionizada T-102 y T-309	26
11.1.4. Tanques pulmón	28
11.1.4.1. Tanque pulmón T-203	28
11.1.4.2. Tanque pulmón T-210	30
11.1.5. Viento de tanques de almacenajes a presión atmosféricos	31
11.1.5.1. Viento normal	31
11.1.5.2. Viento de emergencia	31
11.1.6. Soportes	32
11.1.7. Cubetos	33

11.1.8. Tanque de almacenamiento de fenol recuperado de proceso T-701	36
11.2. Tanques de mezcla	38
11.2.1. Mixer M-201	38
11.2.2. Tanque de precipitación T-207	41
11.2.3. Tanque de homogenización M-205	43
11.2.4. Tanque de homogenización M-302	45
11.3. Diseño de reactor	47
11.3.1. Reactor de carboxilación R-204	47
11.3.2. Reactor de acetilación R-301	54
11.4. Diseño de agitación	57
11.4.1. Tipos de impulsores	57
11.4.1.1. De pala tipo ancla	57
11.4.1.2. De turbina tipo hojas inclinadas	58
11.4.2. Números adimensionales	59
11.4.2.1. Número de Reynolds (Re)	59
11.4.2.2. Número de potencia (Np)	59
11.4.2.3. Número de Froude (Fr)	60
11.4.3. Consumo de potencia mediante Np	60
11.4.4. Consumo de potencia para n° de Re <300 con o sin placas deflectoras ..	62
11.5. Diseño de media caña	64
11.5.1. Determinar Q	64
11.5.2. Coeficiente global de transmisión de calor	65
11.5.3. Área de transmisión de calor	65
11.5.4. Sección hidráulica	66
11.5.5. Diámetro interior de la mediacaña	66
11.5.6. Diámetro exterior de la mediacaña	66
11.5.7. Distancias libres entre mediacañas	68
11.6. Aislamiento	69

11.7. Columna de adsorción de carbón activado.....	73
11.8. Intercambiadores de calor	74
11.9. Bombas	76
11.9.1. Balance de energía mecánica.....	76
11.9.2. Cálculo pérdidas de carga en tramos rectos	76
11.9.3. Cálculo pérdidas de carga en accidentes.....	77
11.9.4. Cálculo potencia de la bomba	79
11.10. Compresores.....	80
11.11. Sala blanca.....	81
11.12. BIBLIOGRAFÍA	82

11. Manual de cálculos

11.1. Tanque de almacenamiento y tanques pulmón

El proceso de fabricación de ácido acetilsalicílico requiere dos reacciones principales y el uso de diferentes sustancias tales como reactivos y carbón activo. Las sustancias que se deberán almacenar en tanques de almacenamiento son todos los reactivos (fenol, NaOH, dióxido de carbono, ácido sulfúrico, anhídrido de acético y óxido de calcio), el subproducto (acetato de calcio) y el producto (ácido acetilsalicílico). Además, también se debe almacenar el carbón activo usado en la adsorción.

11.1.1. Diseño mecánico

En primer lugar, se explicarán los códigos utilizados para el cálculo de los espesores con sus respectivas ecuaciones. Ha sido necesario utilizar dos códigos distintos para el diseño de los tanques ya que, en la planta, hay presencia de tanques con presión atmosférica y de tanques con presión superior a la atmosférica. Los dos códigos para un correcto diseño son: API 650 y ASME.

11.1.1.1. Tanques a presión atmosférica: API

Para el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento de la planta se ha seguido punto a punto todas las consideraciones que aparecen en el código API 650 para un diseño óptimo de los tanques.

Diseño y cálculo del cuerpo:

El espesor mínimo que debe tener el cuerpo del tanque está directamente relacionado con el diámetro nominal del tanque en metros. Como los tanques a diseñar todos tienen un diámetro nominal menor de 15,24 metros, el espesor mínimo será de 4,76 mm.

Para el cálculo del espesor del cuerpo se ha utilizado el método de un pie que la única consideración a tener en cuenta es que sólo es aplicable en tanques con un diámetro igual o menor a 61 m. Con este método se calcula el espesor requerido de la pared del tanque por condiciones de diseño y de prueba hidrostática. Esta última prueba da información del espesor del tanque si éste es llenado con agua en vez de con la sustancia a almacenar. Si el espesor calculado por prueba hidrostática es mayor que el

calculado por condiciones de diseño, se usará el obtenido por condiciones de prueba hidrostática. Las dos ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$td = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{Sd} + C \quad eq. 11.1.1$$

$$tt = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{St} + C \quad eq. 11.1.2$$

Dónde:

- td: Espesor por condiciones de diseño (mm).
- tt: Espesor por prueba hidrostática (mm).
- D: Diámetro nominal del tanque (m).
- H: Altura de diseño del nivel del líquido (m).
- G: Densidad relativa del líquido a almacenar o del agua para cálculo por prueba hidrostática.
- C: Corrosión permisible (mm).
- Sd: Esfuerzo permisible por condiciones de diseño (MPa).
- St: Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática (MPa).

5.6.1.1 The required shell thickness shall be the greater of the design shell thickness, including any corrosion allowance, or the hydrostatic test shell thickness, but the shell thickness shall not be less than the following:

Nominal Tank Diameter		Nominal Plate Thickness	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 15	< 50	5	3/16
15 to < 36	50 to < 120	6	1/4
36 to 60	120 to 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Notes:

1. Unless otherwise specified by the Purchaser, the nominal tank diameter shall be the centerline diameter of the bottom shell-course plates.
2. The thicknesses specified are based on erection requirements.
3. When specified by the Purchaser, plate with a nominal thickness of 6 mm may be substituted for 1/4-in. plate.
4. For diameters less than 15 m (50 ft) but greater than 3.2 m (10.5 ft), the nominal thickness of the lowest shell course shall not be less than 6 mm (1/4 in.).

Figure 11.1-1. Espesor requerido segon el diametro de tanque. (Welded Steel Tanks for Oil Storage, API 650).

Diseño y cálculo del fondo:

El espesor mínimo del fondo, que viene dado por el esfuerzo para prueba hidrostática del material ($St = 1580,56 \text{ kg/cm}^2$, en este caso SA-516), será de como mínimo 6,35 mm (*Welded Steel Tanks for Oil Storage*, API 650). Este valor no incluye el espesor por corrosión especificado, que será de 2 mm. Haciendo una suma de 8,35 mm de espesor mínimo.

Diseño y cálculo de techos

Los tanques de almacenamiento a diseñar constarán de techo tipo fijo. A su vez, serán de tipo cónico y auto soportados. Independientemente de su forma o del método de soporte, los techos son diseñados para soportar una carga viva de por lo menos 1,76 Kg/cm^2 más la carga muerta ocasionada por el mismo tanque.

Las placas del techo tendrán un espesor mínimo nominal de 4,7 mm, en este caso, el espesor por corrosión tampoco estará incluido en el mínimo, por tanto, el espesor mínimo del techo será de 6,7 mm. Además, todos los miembros estructurales internos y externos de techos soportados tendrán un espesor mínimo nominal de 4,32 mm más la corrosión.

La consideración primordial para el diseño de este tipo de techos es el diámetro de los tanques que no tiene que exceder los 18,288 m, siendo recomendable diseñarlos en tanques con diámetro no superior a 12,192 m. Cabe destacar que estos techos tendrán como máximo una pendiente de 37° y como mínimo de 9.5° . El espesor del techo viene determinado por la siguiente fórmula:

$$Tt = \frac{D}{4800 * \operatorname{sen}\theta} \quad \text{eq. 11.1.3}$$

Dónde:

- Tt : Espesor mínimo requerido (cm).
- D : Diámetro medio del tanque (cm).
- θ : Ángulo con respecto a la horizontal (grados).

11.1.1.2. Tanques a presión superior a la atmosférica: ASME

El código ASME ha sido utilizado para diseñar los tanques de almacenamiento con presión superior a la atmosférica. Para el diseño se han tenido en cuenta los siguientes parámetros:

Presión de diseño (P)

La presión de diseño es la presión utilizada para el diseño del equipo. Esta presión siempre será superior a la presión de operación para que el equipo pueda resistir presiones levemente superiores a la de operación. Es decir, la presión de diseño se aplica para sobredimensionar el equipo y no tener problemas cuando se opera. Viene dada por la siguiente ecuación:

$$P = 1.15 * (Pop + \Delta P) \quad eq. 11.1.4$$

Presión hidrostática (ΔP)

La presión hidrostática es la presión que viene dada por el peso del fluido en reposo. Esta presión viene dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \rho * h * g \quad eq. 11.1.5$$

Dónde:

- ρ : Densidad del fluido (kg/m³)
- g : Fuerza de la gravedad (m/s²)
- h : Altura de la columna de líquido (m)

Presión de operación (Pop)

La presión de operación es la presión a la que estará sometido el tanque de almacenamiento a diseñar. En resumen, es la presión de trabajo.

Temperatura de diseño (T)

De la misma manera que se sobredimensiona el equipo a efectos de presión, también se realizará a efectos de temperatura. La temperatura de diseño es superior a la temperatura de operación y viene dada por la siguiente ecuación:

$$T = Top + 15 \quad eq. 11.1.6$$

Temperatura de operación (Top)

La temperatura de operación es la temperatura a la que estará el tanque de almacenamiento. En definitiva, esta es la temperatura de operación del tanque.

Cabe destacar que, en estos dos últimos parámetros comentados, Top y Pop, se han de identificar de manera clara cuáles serán los valores máximos y mínimos de presión y temperatura a los que el tanque podrá alcanzar para así evitar posibles fallos en su futura operación.

Límite elástico (S)

El límite elástico es la tensión máxima a la que se puede someter el material sin que sufra deformaciones permanentes. Este límite es distinto para cada material y a su vez varía según la temperatura a la cual esté. Para los tanques se ha utilizado acero inoxidable 316 (AISI 316) debido a la corrosión de las sustancias a almacenar. El valor del límite elástico de este material es de 28000 psi.

Factor de soldadura (E)

El factor de soldadura permite tener en cuenta el posible error que pueda contener el límite elástico, es decir, dimensiona el tanque en términos de tensión para asegurar que éste no se deforme cuando sobra tensión. En este caso, el valor del factor de soldadura es de 0.85 ya que se ha utilizado un radiografiado parcial.

Factor M

El factor M es la relación entre los radios del cabezal escogido, en este caso, torisférico. En la siguiente figura 11.2.2.2-a se muestran las variables que se utilizan (ASME pdf 427, pg 375):

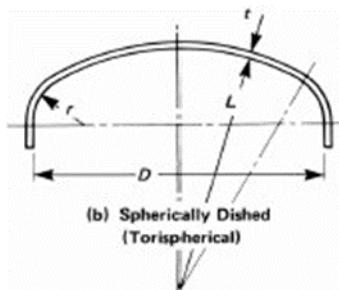


Figure 21.1-2. Variables cabezal torisférico.

Una vez conocido el diámetro se usan las siguientes ecuaciones para obtener las variables necesarias:

$$L = 0.9 * D \quad \text{eq. 11.1.7}$$

$$r = 0.085 * L \quad \text{eq. 11.1.8}$$

A partir de aquí, con la relación L/r y la figura 11.1.2.2-a (American Society of Mechanical Engineers, 1995) mostrada a continuación, se obtiene el parámetro M. Si el valor de L/r no corresponde exactamente con ninguno de la tabla se procede a realizar una interpolación para así encontrar el valor exacto de M:

Tabla 11.1-1. Factor M

L/r	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
M	1	1,03	1,06	1,08	1,1	1,13	1,15	1,17	1,18	1,2	1,22
L/r	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
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	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15	16	$\frac{16}{2/3}$
M	1,52	1,54	1,56	1,58	1,6	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,77

Sobreespesor por corrosión (C1)

En los materiales con indicios de corrosión, se añade un espesor por corrosión. Este espesor compensa la corrosión que van sufriendo los equipos con las sustancias a medida que pasa el tiempo. Este valor habitualmente oscila entre 1 y 6 mm durante la vida útil de los equipos de aproximadamente 10 años. El valor de sobreespesor por corrosión escogido es de 2 mm.

Tolerancia de fabricación (C2)

El equipo puede perder parte de su espesor debido a la deformación de su curvatura por ello, tanto en el cuerpo cilíndrico como el cabezal, se añade una tolerancia de fabricación de 2mm.

Velocidad o presión del viento

Los equipos instalados en el exterior estarán sometidos a la fuerza del viento, aunque esto afectará de manera considerable a equipos de altura considerable. En el caso de los tanques de almacenamiento, la acción del viento se considerará nula debido a la

escasa altura de estos y por tanto no se tiene en cuenta este factor a la hora de realizar el diseño.

Coeficiente sísmico

De igual forma que el apartado anterior, teniendo en cuenta la zona geográfica donde se situará la planta, se considera insignificante la actividad sísmica en el diseño de los tanques.

Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico

Para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico se utiliza la siguiente ecuación:

$$t_{cilindro} = \frac{PR}{SE - 0.6P} + C1 + C2 \quad eq. 11.1.9$$

Dónde:

- $t_{cilindro}$: Espesor del cuerpo (mm).
- P: Presión de diseño (atm).
- R: Radio interior del tanque (mm).
- S: Límite elástico (atm).
- E: Factor de soldadura (0.85).
- C1: Sobreespesor por corrosión (mm).
- C2: Tolerancia de fabricación (mm).

Cálculo del espesor del cabezal

Para el cálculo del cabezal, se escoge la siguiente ecuación ya que el cabezal escogido es de tipo toriesférico:

$$Si \frac{L}{r} < 16 * \frac{2}{3} \quad t_{cabezal} = \frac{PLM}{2SE - 0.2P} + C1 + C2 \quad eq. 11.1.10$$

$$Si \frac{L}{r} \geq 16 * \frac{2}{3} \quad t_{cabezal} = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} + C1 + C2 \quad eq. 11.1.11$$

Dónde:

- $t_{cabezal}$: Espesor del cabezal (mm).
- P: Presión de diseño (atm).
- M: Factor M.
- L: Radio de la esfera que forma el toriesférico (mm).
- S: Límite elástico (atm).

-
- E: Factor de soldadura (0.85).
 - C1: Sobreespesor por corrosión (mm).
 - C2: Tolerancia de fabricación (mm).

11.1.1.3. Cálculo de la presión máxima de cuerpo cilíndrico

La presión máxima de trabajo, conocida en inglés como "Maximum Allowance Working Pressure", se obtiene aislando la presión de la ecuación 11.1.9.

$$MAWP_{cilindro} = \frac{S * E * t_{cilindro}}{R + 0.6 t_{cilindro}} \quad eq. 11.1.12$$

11.1.1.4. Cálculo de la presión máxima de cuerpo cabezal

Para el cálculo de la presión máxima permitida del cabezal, se procede igual que para el cálculo del cilindro del apartado 11.1.1.3.

$$MAWP_{cabezal} = \frac{S * E * t_{cabezal}}{0.885 * L + 0.1 * t_{cabezal}} \quad eq. 11.1.13$$

11.1.2. Cálculo de las dimensiones de los tanques

11.1.2.1. Cálculo de la altura del tanque

Para el cálculo de la altura del tanque es esencial conocer el diámetro y la altura del cilindro. Estos parámetros se calculan con el volumen que ocupará el líquido. La capacidad del tanque se sobredimensiona un 20% para no tener los tanques completamente llenos y así facilitar la manipulación de las sustancias que se almacenen. La relación utilizada entre la altura y el diámetro del cilindro es de: HCILINDRO/D = 1,5.

El objetivo de este cálculo es saber la altura total del tanque, pero para este cálculo es preciso conocer la altura correspondiente al cabezal que se calcula de la siguiente manera:

Altura del cabezal cónico

Para este cálculo se utilizan las siguientes reglas trigonométricas:

$$h_{cónico} = \tan\theta * r \quad eq. 11.1.14$$

Dónde:

- r : Radio del tanque (m).
- θ : Ángulo con respecto a la horizontal (grados).
- $h_{cónico}$: Altura del cono(m)

Una vez conocida la altura del cabezal cónico, la altura total del equipo viene definida por la siguiente ecuación:

$$h_{equip} = h_{cono} + h_{cilindro} + h_{base} \quad eq. 11.1.15$$

Altura del cabezal toriesférico

La altura del cabezal toriesférico se calcula siguiendo el catálogo de la empresa Fondeyur S.L (bibliografía). A continuación, se muestran la figura 11.1.3.1-a y las ecuaciones donde aparecen las variables a tener en cuenta:

Fondo KLOPPER (DIN-28011)

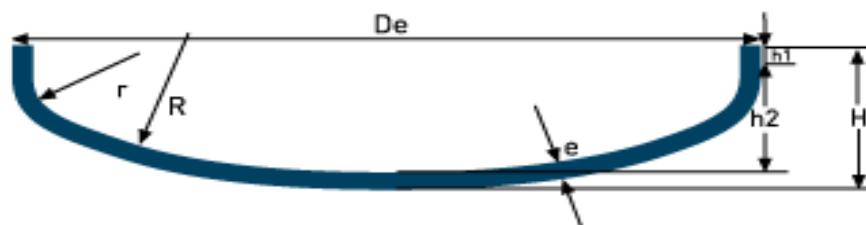


Figura 11.1-3. Variables identificadas del fondo Klopper.

Referencia: F1

Norma: DIN

Ejemplo práctico

De	e	R	r	h1	H	V(h2)
2000	10	2000	200	50	442	776

Información técnica


$$R = De$$

$$r = R/10$$

$$h1 \geq 3,5e$$

$$h2 = 0.1935De - 0.455e$$

$$H = h2 + h1 + e$$

$$Dd = 1.11De + 1.85h1$$

$$V(h2) = 0.1(Di)^3$$

Figura 21.1-4. Variables identificadas del fondo Klopper.

11.1.2.2. Cálculo del volumen del equipo

El volumen del equipo viene dado por las condiciones de proceso establecidas, no obstante, se requieren unos ciertos días de stock para tener siempre en reserva tanto reactivo como producto, en caso de causas externas a la planta como por ejemplo huelgas generales que conllevaría la huelga de camiones cisterna. Para el cálculo del volumen de los equipos se utiliza el volumen del cabezal y el volumen del cilindro. El volumen del cilindro viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} Di^2 * h_{cilindro} \quad eq. 11.1.16$$

Para el cálculo del volumen del cabezal se diferencia entre los equipos cónicos y tónerosféricos:

$$V_{cónico} = \frac{1}{3} * \frac{\pi}{4} Di^2 * h_{cónico} \quad eq. 11.1.17$$

$$V_{Klopper} = 0.1 * Di^3 \quad eq. 11.1.18$$

11.1.2.3. Cálculo del peso del equipo

El peso del equipo viene dado por el peso del fondo, del cabezal y del cuerpo. A continuación, aparecen las ecuaciones para el cálculo de estos tres parámetros:

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2) * h_{cilindro} * \rho \quad eq. 11.1.19$$

$$M_{cónico} = \frac{1}{3} * \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2) * h_{cónico} * \rho \quad eq. 11.1.20$$

$$M_{fondo\ plana} = \frac{\pi}{4} De^2 * t_{fondo} * \rho \quad eq. 11.1.21$$

$$M_{Klopper} = 0.1 * (De^3 - Di^3) * \rho \quad eq. 11.1.22$$

Dónde:

- De: Diámetro externo (m).
- Di: Diámetro interno (m).
- h: Altura (m).
- t: Espesor (m).
- ρ: Densidad del material (Kg/m3).

La ecuación para el peso del tanque en operación es la misma para los dos casos siendo:

$$M_{operación} = M_{equipo} + V_{fluido} * \rho_{fluido} \quad eq. 11.1.23$$

11.1.3. Tanques de almacenamiento

Para realizar el diseño del tanque, se necesita conocer el volumen de la substancia a almacenar y las condiciones de almacenaje. Se ha escogido el acero inoxidable AISI 316L como material de todos los tanques, debido a su buena resistencia a las factoras de corrosión, proporciona unas muy buenas condiciones de deformación y de resistencia a la tensión.

Los tanques para el almacenamiento de substancias en estado líquido tendrán la geometría de un tanque cilindro con fondo y cabezal klopper. Parar los sólidos, se usarán tanques cilindros con cabezal cónico y fondo plano. Cada tanque está montado con tres patas que llevan una cedula de peso cada una de ellas.

Tabla 21.1-2. Propiedad de acero inoxidable AISI 316L.

AISI 316L	
Densidad (Kg/m3)	7980
S Límite elástico (atm)	1973
K conductividad térmica (W/m2 °C)	16.2
E Factor de soldadura	0.85
Sd Esfuerzo permisible por condiciones de diseño (MPa)	137 ¹
Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática (MPa)	154

El volumen ha sido calculado a partir del consumo diario, peso molecular, densidad, 7 días de stock y un sobre dimensionamiento de 20% parar dar volumen al tanque.

$$volum = n^o \text{ de reactivo} \left(\frac{kmols}{lote} \right) * \frac{4 \text{ lotes}}{\text{dia}} * \frac{7 \text{ dias}}{\text{semana}} * PM/\rho \quad eq. 11.1.24$$

Dónde:

- PM: peso molecular (Kg/kmol)
- ρ: densidad (Kg/m3)

¹ Como no se ha encontrado el valor de Sd y St de AISI 316L en API650 se considera que tiene el valor más pequeño de las materias que aparece en tabla 5-2a de la página 13 del capítulo 5 de API standard 650.

Ejemplo de cálculo de volumen de fenol:

$$41.37 \text{ m}^3 \text{ fenol} = 16.80 \frac{\text{kmols}}{\text{lote}} * \frac{4 \text{ lotes}}{\text{dia}} * \frac{7 \text{ dias}}{\text{semana}} * \frac{94.11 \text{ kg}}{\text{kmol}} / 1070 \text{ kg/m}^3$$

11.1.3.1. Tanque de almacenamiento de fenol T-101

Como el tanque de fenol trabaja a presión atmosférica, se escoge el código API 650 para realizar el diseño.

Tabla 11.1-3. Requerimientos y Dimensionamiento del tanque de fenol.

Volumen y condiciones de almacenaje	
Volumen de fluido (m³)	41.37
Volumen de tanque (m³)	50.00
Densidad (Kg/m³)	1070
Temperatura (°C)	45-60
Presión (atm)	Atmosférica

Primero de todo hay que determinar dos variables geométricas básicas del tanque, Diámetro interior y relación altura y diámetro:

$$Di = \sqrt[3]{\frac{V_{cilindro} * 4}{2 * \pi}} \quad \text{eq. 11.1.25}$$

$$Di = \sqrt[3]{\frac{41.37 \text{ m}^3 * 4}{2 * \pi}} = 3.49 \text{ m}$$

$$Hc = 1.5 * Di \quad \text{eq. 11.1.26}$$

$$Hc = 5.23 \text{ m}$$

Código API 650:

Espesor del cuerpo (cilíndrico):

$$td = \frac{4.9 * 3.49 \text{ m} * (5.23 \text{ m} - 0.3) * 1.07}{137 \text{ MPa}} + 4 \text{ mm}$$

$$td = 4.66 \text{ mm}$$

$$tt = \frac{4.9 * 3.49 \text{ m} * (5.23 \text{ m} - 0.3) * G}{154 \text{ MPa}} + 4 \text{ mm}$$

$$tt = 4.59 \text{ mm}$$

El resultado del código API 650, $tt = 4.66 \text{ mm}$ se encuentra por debajo de 4.76 mm (espesor mínimo según la Figure 31.1-1). Por lo tanto, se toma el valor de 4.76 mm como espesor de cilindro.

A continuación, se muestra paso a paso el cálculo del resto de parámetros de diseño mecánico.

Espesor del cabezal (cónico):

$$Tt = \frac{D}{4800 * \operatorname{sen}\theta}$$

$$Tt = \frac{3497.48}{4800 * \operatorname{sen} 25} = 5.72 \text{ mm}$$

El espesor mínimo del fondo

$$T_{fondo} = 8.35 \text{ mm}$$

Una vez calculados los espesores del tanque se calculan las dimensiones del tanque siguiendo las ecuaciones del apartado 11.1.2.

Altura del cabezal cónico

$$h_{cónico} = \operatorname{tan}\theta * r$$

$$h_{cónico} = \operatorname{tan} 25 * \left(\frac{3497.48}{2} \right) = 821.17 \text{ mm}$$

Altura del equipo

$$h_{equip} = h_{cónico} + h_{cilindro} + T_{fondo} = \frac{821.17 + 8.35}{1000} \text{ m} + 5.23 \text{ m} = 6.06 \text{ m}$$

El volumen del equipo

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} Di^2 * h_{cilindro}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} 3.49^2 * 5.23 = 50.27 \text{ m}^3$$

$$V_{cónico} = \frac{1}{3} * \frac{\pi}{4} Di^2 * h_{cónico}$$

$$V_{cónico} = \frac{1}{3} * \frac{\pi}{4} 1.737^2 * \frac{821.17 - 5.72}{1000} = 2.58 \text{ m}^3$$

$$V_{equipo} = V_{cilindro} + V_{cónico} = 52.84 \text{ m}^3$$

El peso del equipo bruto y en operación

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2) * h_{cilindro} * \rho$$

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (3.50^2 - 3.49^2) \text{ m}^2 * 5.23 \text{ m} * 7980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2134.29 \text{ kg}$$

$$M_{cónico} = \frac{1}{3} * \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2) * h_{cónico} * \rho$$

$$M_{cónico} = \frac{1}{3} * \frac{\pi}{4} (3.50^2 - 3.49^2) \text{ m}^3 * 0.82 \text{ m} * 7980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1129.93 \text{ kg}$$

$$M_{fondo\ plana} = \frac{\pi}{4} De^2 * t_{fondo} * \rho$$

$$M_{fondo\ plana} = \frac{\pi}{4} 3.50^2 * 0.00835 \text{ m} * 7980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 640.16 \text{ kg}$$

$$M_{equipo} = M_{cilindro} + M_{cónico} + M_{fondo\ plana}$$

$$M_{equipo} = 2134.29 + 1129.93 + 640.16 = 3904.38 \text{ kg}$$

$$M_{operación} = M_{equipo} + V_{fluido} * \rho_{fluido}$$

$$M_{operación} = 3400.51 \text{ kg} + 41.37 \text{ m}^3 * 1070 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 48170.28 \text{ kg}$$

Tabla 11.1-4. Dimensiones del tanque de fenol.

Tipo de tanque: Cónico	
Volumen fluido m3	41.37
Volumen (m3)	50.00
Densidad (kg/m3)	1070.00
Di (m)	3.49
Ri (m)	1.74
De (m)	3.50
Hc (m)	5.23
Hc/Di	1.50

Ocupación (%)	0.78
Pop (atm)	1.00
Δ P (atm)	0.54
Pd (atm)	1.77
Top (°C)	45.00
T (°C)	60.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cil (mm)	4.66
m cilindro (kg)	2134.29
t fondo (mm)	8.35
h fondo (mm)	8.35
m fondo (kg)	640.16
α (°)	25
t cónico (mm)	5.72
h cónico (mm)	821.17
m cónico (kg)	1129.93
V cónico (m3)	2.58
H equipo (m)	6.06
V equipo (m3)	52.84
M equipo (kg)	3904.38
M equipo op (kg)	48170.28

El fenol tiene un punto de fusión (40-43°C) por encima de la temperatura ambiente y el proceso trabaja con fenol líquido, por lo tanto, necesita un sistema del calentamiento para mantener la temperatura del tanque dentro del rango (45-60°C). El mecanismo de intercambio de calor elegido es la mediacaña. Por su alta eficacia en transferencia de calor, facilidad de instalación y buena estabilidad. El diseño de esta se realiza según los procedimientos de apartado 11.5.

A continuación, se muestra paso por paso el procedimiento:

La cantidad de calor que hay que subministrar al tanque se considera como el calor necesario para calentar el tanque lleno de fenol de 45°C a 60°C en una hora.

$$Q = m * Cp * \Delta T$$

$$Q = 470400 \text{ mols} * 199.8 \frac{\text{J}}{\text{mol} \text{ } ^\circ\text{C}} * (60 - 45)^\circ\text{C}$$

$$Q = 9.40 * 10^4 \text{ KJ}$$

$$Tiempo = 0.5 \text{ h} = 1800 \text{ s}$$

$$Q = 52.21 \text{ W}$$

El coeficiente global de transmisión de calor se calcula para el caso más desfavorable, se utiliza el factor de ensuciamiento típico de agua (5556 W/m² °C) y el coeficiente individual mínimo para la mezcla y agua refrigerante.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{250} + \frac{1}{1500} + \frac{1}{5556} + \frac{1}{5556} + \frac{16.2}{0.01}$$

$$U = 177.18 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta Tml = \frac{95 - 85}{\ln(\frac{60 - 95}{60 - 85})} = 29.72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Área requerida:

$$A = \frac{Q}{U * \Delta Tml} = \frac{52.21 \text{ W}}{177.18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ } ^\circ\text{C} * 29.72 \text{ } ^\circ\text{C}} = 9.92 \text{ m}^2$$

Sección hidráulica y diámetro interior de la mediacaña:

$$m = \frac{Q}{Cp * (T1 - T2)} = \frac{1.88 * 10^5 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}}{4.186 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (95 - 85)} = 4490.49 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m = 4490.49 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 4.49 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$S = \frac{\frac{4.49 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{1.22 \text{ m/s}} = 1.02 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Di = 2 * \sqrt{\frac{2 * 1.02 * 10^{-3} \text{ m}^2}{\pi}} = 0.05104 \text{ m} = 51.04 \text{ mm}$$

El D exterior de la mediacaña según la estandarización que indica la figura 11.5-1, es DN 65 y la distancia libre entre media cañas para hacer la soldadura se calcula:

$$L = \frac{9.92 \text{ m}^2}{0.05104 \text{ m}} = 194.29 \text{ m}$$

$$Nespiras = \frac{L}{\pi * 3.50 \text{ m}} = 18$$

$$Dsoldadura = \frac{h_{cilindro} - Nespiras * De}{Nespiras - 1} = \frac{5.23 - 18 * 0.073}{18 - 1} = 0.2363 \text{ m} = 23.63 \text{ cm}$$

Tabla 11.1-5. Dimensiones de la media caña del tanque de fenol.

Di media caña (mm)	51.04
L media caña (m)	194.29
N espiras	18
DN	65
De media caña (cm)	7.30
D soldadura (cm)	23.63

El tanque de fenol se encuentra en el exterior, con el fin de garantizar su aislamiento térmico se cubrirá de lana de roca. Su espesor se calcula con el programa *Insulan* de la empresa CALORCOL, en el cual se debe introducir los datos de la temperatura interior del tanque (60°C), la temperatura a la superficie del aislante, que debe ser de 30°C, la temperatura ambiente, que se ha supuesto de 20°C i la velocidad del aire, que se ha supuesto 2 m/s. Así, se determina que el espesor del aislante será de 1.34 pulgadas con un rendimiento de 93.79%.



Figura 11.1-5. Resultado del diseño del aislamiento del T-101.

Tabla 11.1-6. Capacidad de viento de emergencia del tanque de fenol.

ΔH_{vap} (kJ/kg)	497.29
Área húmeda (m²)	47.44
Q fuego (kJ/h)	827139.53
C Viento (m³/h)	756.80

11.1.3.2. Tanque de almacenamiento de NaOH S-106

Como el tanque de fenol trabaja a presión atmosférica, en teoría se debería escoger el código API 650 para realizar el diseño, pero el ASME nos proporciona más información, y, además debido a que el volumen de almacenaje es relativamente pequeño, la geometría que tendrán los tanques será más apropiada al Código ASME.

Tabla 11.1-7. Requerimientos y Dimensionamiento del tanque NaOH.

Volumen y condiciones de almacenaje	
Volumen de fluido (m³)	8.83
Volumen de tanque (m³)	11.00
Densidad (Kg/m³)	2130.00
Temperatura (°C)	T. Ambiente
Presión (atm)	Atmosférica

Código API 650:

Espesor del cuerpo (cilíndrico):

$$td = \frac{4.9 * 2.11 \text{ m} * (5.23 \text{ m} - 0.3) * 1.07}{137 \text{ MPa}} + 4 \text{ mm}$$

$$td = 4.46 \text{ mm}$$

$$tt = \frac{4.9 * 2.11 \text{ m} * (5.23 \text{ m} - 0.3) * G}{154 \text{ MPa}} + 4 \text{ mm}$$

$$tt = 4.41 \text{ mm}$$

Código ASME:

Presión hidrostática:

$$\Delta P = 2130 \text{ Kg/m}^3 * 3.16 \text{ m} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta P = \frac{65999.97 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}}{\text{s}^2} = 65999.97 \text{ Pa} = 0.65 \text{ atm}$$

Presión de operación y de diseño:

$$P = 1.15 * (1 + 0.65) \text{ atm}$$

$$P = 1.90 \text{ atm}$$

Temperatura de operación y de diseño:

$$Top = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

Espesor del cuerpo (cilíndrico):

$$t_{cilindro} = \frac{1.77 \text{ atm} * 1740 \text{ mm}}{1905 \text{ atm} * 0.85 - 0.6 * 1.77 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} + 2 \text{ mm}$$

$$t_{cilindro} = 5.24 \text{ mm}$$

El resultado del código API 650, $tt = 4.46 \text{ mm}$ se encuentra por debajo de 4.76 mm (espesor mínimo según la Figure 41.1-1). Mientras que el resultado de ASME está por encima de este valor. Por lo tanto, el resto del diseño se basará en el código ASME.

Tabla 11.1-8. Dimensiones del tanque de NaOH.

Tipo de tanque: cabezal Klopper con fondo toricónico	
Volumen fluido (m³)	8.83
Volumen cilindro (m³)	11.00
Densidad (kg/m³)	2130.00
Di (m)	2.11
Ri (m)	1.05
De (m)	2.12
Hc (m)	3.16
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.65
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.65
Pd (atm)	1.90

Top (°C)	25.00
T (°C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	5.24
Pmax cilindro (atm)	8.03
t klopper (mm)	5.97
Pmax klopper (atm)	6.33
Hklopper (m)	433.62
Vklopper (m3)	0.93
M klopper (kg)	111.71
α (°)	30
t toricónico (mm)	5.29
h toricónico (mm)	1649.42
M toricónico (kg)	315.45
V toricónico (m3)	1.53
Hequipo (m)	5.24
Vequipo (m3)	13.57
Meuipo (kg)	1302.38
Meuipo op (kg)	20110.28

11.1.3.3. Tanque de almacenamiento de CO2 T-107

Tanto el tanque de CO2 como el gas en si serán subministrados por la empresa Linde.

Tabla 11.1-9. Requerimientos y Dimensionamiento del tanque de CO2.

Volumen y condiciones de almacenaje	
Volumen de fluido (m3)	10.46
Volumen de tanque (m3)	
Densidad (Kg/m3)	
Temperatura (°C)	
Presión (atm)	

11.1.3.4. Tanque de almacenamiento de H₂SO₄ 60% T-103

Tabla 11.1-10. Requerimientos y Dimensionamiento del tanque de H₂SO₄ 60%.

Volumen y condiciones de almacenaje	
Volumen de fluido (m³)	26.72
Volumen de tanque (m³)	32.00
Densidad (Kg/m³)	1377.00
Temperatura (°C)	T. Ambiente
Presión (atm)	Atmosférica

Tabla 11.1-11. Dimensiones del tanque de H₂SO₄ 60%.

Tipo de tanque: Cónico	
Volumen fluido m³	26.72
Volumen (m³)	32.00
Densidad (kg/m³)	1377.00
Di (m)	3.01
Ri (m)	1.50
De (m)	3.02
Hc (m)	4.51
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.79
Pop (atm)	1.00
Δ P (atm)	0.60
Pd (atm)	1.84
Top (°C)	25.00
T (°C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cil (mm)	4.62
m cilindro (kg)	1573.36
t fondo (mm)	8.35
h fondo (mm)	8.35
m fondo (kg)	475.80
α (°)	25

t cónico (mm)	5.49
h cónico (mm)	708.50
m cónico (kg)	804.88
V cónico (m3)	1.65
H equipo (m)	5.23
V equipo (m3)	33.85
M equipo (kg)	2854.03
M equipo op (kg)	39647.47

Tabla 11.1-12. Capacidad de venteo de emergencia del tanque de H₂SO₄ 60%.

ΔH_{vap} (kJ/kg)	511.02
Área húmeda (m²)	35.56
Q fuego (kJ/h)	652950.14
C Venteo (m³/h)	569.49

11.1.3.5. Tanque de almacenamiento de anhídrido acético T-104

Tabla 11.1-13. Requerimientos y Dimensionamiento del tanque de Anhídrido acético.

Volumen y condiciones de almacenaje	
Volumen de fluido (m³)	36.75
Volumen de tanque (m³)	44.00
Densidad (Kg/m³)	1080.00
Temperatura (°C)	T. Ambiente
Presión (atm)	Atmosférica

Tabla 11.1-14. Dimensiones del tanque de Anhídrido acético.

Tipo de tanque: Cónico	
volum fluido m³	36.75
Volumen (m³)	44.00
Densidad (kg/m³)	1080.00
Di (m)	3.34
Ri (m)	1.67
De (m)	3.35

Hc (m)	5.01
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.79
Pop (atm)	1.00
Δ P (atm)	0.52
Pd (atm)	1.75
Top (°C)	25.00
T (°C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cil (mm)	4.61
m cilindro (kg)	1939.09
t fondo (mm)	8.35
h fondo (mm)	8.35
m fondo (kg)	587.97
α (°)	25
t cónico (mm)	5.65
h cónico (mm)	787.15
m cónico (kg)	1024.76
V cónico (m3)	2.27
H equipo (m)	5.81
V equipo (m3)	46.51
M equipo (kg)	3551.82
M equipo op (kg)	43241.82

Tabla 11.1-15. Capacidad de venteo de emergencia del tanque de Anhídrido acético.

ΔH_{vap} (kJ/kg)	466.26
Área húmeda (m²)	43.98
Q fuego (kJ/h)	777288.80
C Venteo (m³/h)	728.28

11.1.3.6. Tanque de almacenamiento de óxido de calcio S-105

Tabla 11.1-16. Requerimientos y Dimensionamiento del tanque CaO.

Volumen y condiciones de almacenaje	
Volumen de fluido (m³)	3.26
Volumen de tanque (m³)	4.00
Densidad (Kg/m³)	3340.00
Temperatura (°C)	T. Ambiente
Presión (atm)	Atmosférica

Tabla 11.1-17. Dimensiones del tanque de CaO.

Tipo de tanque: cabezal Klopper con fondo toricónico	
Volumen fluido (m³)	3.26
Volumen cilindro (m³)	4.00
Densidad (kg/m³)	3340.00
Di (m)	1.50
Ri (m)	0.75
De (m)	1.51
Hc (m)	2.25
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.66
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.73
Pd (atm)	1.99
Top (°C)	25.00
T (°C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.92
Pmax cilindro (atm)	10.57
t klopper (mm)	5.47
Pmax klopper (atm)	8.13
Hklopper (m)	314.86
Vklopper (m³)	0.34

M klopper (kg)	53.60
α (°)	30.00
t toricónico (mm)	4.97
h toricónico (mm)	1179.15
M toricónico (kg)	150.96
V toricónico (m3)	0.55
Hequipo (m)	3.75
Vequipo (m3)	4.95
Meuipo (kg)	624.20
Meuipo op (kg)	11512.60

11.1.3.7. Tanques de agua desionizada T-102 y T-309

Donde se almacena la cantidad de agua desionizada necesaria para los dos tanques de homogenización por duplicado.

Tabla 11.1-18. Dimensiones del T-102.

Tipo de tanque: Cónico	
Volumen fluido m3	4,68
Volumen (m3)	5,00
Densidad (kg/m3)	1000,00
Di (m)	1,62
Ri (m)	0,81
De (m)	1,63
Hc (m)	2,43
Hc/Di	1,50
Ocupación (%)	0,88
Pop (atm)	1,00
Δ P (atm)	0,24
Pd (atm)	1,42
Top (°C)	25,00
T (°C)	40,00
C1 (corrosión)	2,00
C2 (tolerancia)	2,00

t cil (mm)	4,12
m cilindro (kg)	407,49
t fondo (mm)	8,35
h fondo (mm)	8,35
m fondo (kg)	138,59
α (°)	25
t cónico (mm)	4,80
h cónico (mm)	384,21
m cónico (kg)	205,09
V cónico (m3)	0,26
H equipo (m)	2,82
V equipo (m3)	5,31
M equipo (kg)	751,16
M equipo op (kg)	5431,50

Tabla 11.1-19. Dimensiones del T-309.

Tipo de tanque: Klopper	
Volumen fluido (m3)	6.80
Volumen cilindro (m3)	7.00
Densidad (kg/m3)	1000.00
Di (m)	1.81
Ri (m)	0.91
De (m)	1.82
Hc (m)	2.72
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.82
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.26
Pd (atm)	1.45
Top (° C)	25.00
T (° C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.81

P_{max} cilindro (atm)	8.58
t klopper (mm)	5.29
P_{max} klopper (atm)	6.53
H_{klopper} (m)	373.75
V_{klopper} (m³)	0.59
M_{klopper} (kg)	76.00
H_{equipo} (m)	3.46
V_{equipo} (m³)	8.26
M_{equipo} (kg)	747.31
M_{equipo op} (kg)	7551.31

11.1.4. Tanques pulmón

11.1.4.1. Tanque pulmón T-203

En este tanque se recoge el fenolato de sodio que se ha generado en el Mixer anterior y que posteriormente será vertido por gravedad en el reactor R-201. Hace falta un buen aislamiento térmico ya que el fenolato se encuentra aproximadamente a 200°C y viene de uno tornillo de Arquímedes con resistencia térmica incorporada.

Tabla 11.1-20. Dimensiones del T-203.

Tipo de tanque: Klopper	
Volumen fluido (m³)	1.82
Volumen cilindro (m³)	2.80
Densidad (kg/m³)	1500.00
Di (m)	1.33
Ri (m)	0.67
De (m)	1.34
Hc (m)	2.00
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.55
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.29
Pd (atm)	1.48

Top (°C)	25.00
T (°C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.61
Pmax cilindro (atm)	11.14
t klopper (mm)	4.97
Pmax klopper (atm)	8.33
Hklopper (m)	280.14
Vklopper (m3)	0.24
M klopper (kg)	39.60
Hequipo (m)	2.56
Vequipo (m3)	3.31
Meuipo (kg)	389.15
Meuipo op (kg)	3123.65

En este tanque pulmón, la temperatura del reactivo que se acumula es muy alta, por lo tanto, para garantizar su aislamiento térmico y para evitar posibles accidentes de quemadura se cubrirá de lana de roca. Su espesor se calcula con el programa *Insulan* de la empresa CALORCOL, en el cual se debe introducir los datos de la temperatura interior del tanque (200°C), la temperatura a la superficie del aislante, que debe ser de 40°C, la temperatura ambiente, que se ha supuesto de 25°C y la velocidad del aire, que se ha supuesto 1 m/s. Así, se determina que el espesor del aislante será de 4.79 pulgadas con un rendimiento de 98.03%.

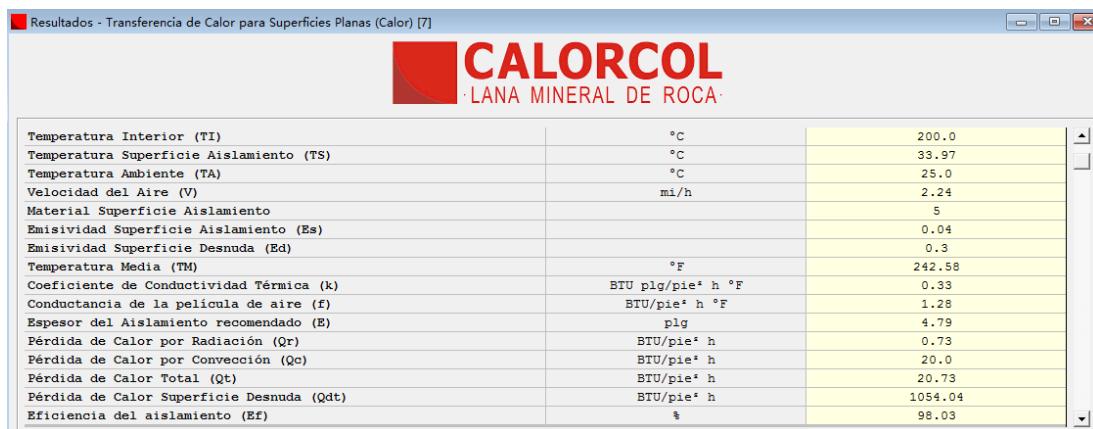


Figura 11.1-6. Resultado del diseño del aislamiento del T-203.

11.1.4.2. Tanque pulmón T-210

En este tanque se recoge el ácido salicílico que se ha salido de secador.

Tabla 11.1-21. Dimensiones del T-210.

Tipo de tanque: Klopper	
Volumen fluido (m³)	1.33
Volumen cilindro (m³)	1.60
Densidad (kg/m³)	1440.00
Di (m)	1.11
Ri (m)	0.55
De (m)	1.12
Hc (m)	1.66
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.70
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.23
Pd (atm)	1.42
Top (° C)	25.00
T (° C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.48
Pmax cilindro (atm)	13.05
t klopper (mm)	4.77
Pmax klopper (atm)	9.63
Hklopper (m)	235.23
Vklopper (m³)	0.14
M klopper (kg)	26.52
Hequipo (m)	2.13
Vequipo (m³)	1.90
Meuipo (kg)	260.52
Meuipo op (kg)	2178.60

11.1.5. Vento de tanques de almacenajes a presión atmosféricos

11.1.5.1. Vento normal

Todo recipiente de almacenamiento deberá disponer de sistemas de vento para prevenir la deformación de este como consecuencia de los procesos en que se llena y se vacía el tanque, así como consecuencia de cambios de temperatura. Los ventos normales de un recipiente tendrán como mínimo un tamaño igual al mayor de las tuberías de llenado o vaciado, y en ningún caso inferior a 35 mm de diámetro interior. Si un recipiente tiene más de una conexión para llenarlo o vaciarlo, la dimensión del vento se basará en el flujo máximo posible. En la salida de todos los ventos en recipiente que permitan presiones mayores a 0,15 bar se dispondrá de forma que la descarga, en caso de inflamarse, no se puedan producir recalentamientos locales o que el fuego incida en cualquier parte del recipiente.

11.1.5.2. Vento de emergencia

El vento de emergencia se da cuando el líquido y los vapores del tanque se exponen a un incendio externo, y hay que evitar un aumento de presión dentro del tanque que pueda originar la ruptura del recipiente o accidentes más graves como una explosión confinada.

A continuación, se calcula la capacidad de vento en caso de emergencia:

Superficie húmeda del tanque:

$$A_{húmeda} = \pi * Di * h_{líquido} \quad eq. 11.1.27$$

Donde:

- $A_{húmeda}$: superficie húmeda del tanque o sea la superficie que sufrirá del fuego externo (m^2).
- Di : diámetro interior del tanque (m).
- $h_{líquido}$: altura del líquido que almacena (m).

Calor de fuego externo:

$$Q_{fuego} = 139.7 * Fp * (A_{húmeda})^{0.82} * 10^3 \quad eq. 11.1.28$$

$$Fp = \frac{1}{4 * \pi X^2} \quad eq. 11.1.29$$

Donde:

- Q_{fuego} : calor (kJ/h).
- $A_{húmeda}$: superficie húmeda del tanque o sea la superficie que sufrirá del fuego externo (m^2).
- Fp : factor de vista (m^{-2}).
- X : distancia entre el foco emisor y el receptor (m).

La capacidad de venteo en caso de emergencia:

$$C_{venteo} = \frac{4.414 * Q_{fuego}}{\lambda_{vap} * \sqrt{PM}} \quad eq. 11.1.30$$

Donde:

- C_{venteo} : capacidad de venteo (m^3/h).
- PM : peso molecular del compuesto ($kg/kmol$).
- λ_{vap} : entalpia de evaporación (kJ/kg).

11.1.6. Soportes

Los tanques de almacenamiento y los tanques pulmón tienen la necesidad de estar soportados por patas o simplemente por el suelo. En el proyecto en cuestión, los dos tipos de tanques que aparecen son los tanques con fondo plano y los tanques con fondo cónico.

Los tanques con fondo plano, siguiendo la guía API 650, no necesitan ser soportados mediante patas. En este caso, la superficie sobre la que descansa el fondo plano del tanque debe quedar a 30 centímetro, como mínimo, por encima del suelo, además de ser impermeable al producto a contener, de forma que las posibles fugas por el fondo salgan.

Por otra parte, para los tanques con fondo cónico, los soportes escogidos son los de tres patas equidistantes, ya que, por su peso, con tres patas es suficiente para aguantar el peso del tanque. De esta forma tendrá más espacio por debajo del tanque para cualquiera necesidad, como, por ejemplo, tareas de mantenimiento o limpieza.

11.1.7. Cubetos

Los cubetos son solo obligatorios en los tanques de almacenamiento de reactivos y productos sujetos a APQ. la función del cubeto es retener las sustancias contenidos en los recipientes de almacenamiento fijo en caso de vertido o fuga de estos.

Las ecuaciones para diseño son los siguientes:

$$A_{cubeto} = (D_{ext} + 2 * X_{tanque-pared})^2 \quad eq. 11.1.31$$

$$A_{ocupada} = \frac{\pi}{4} D_{ext}^2 \quad eq. 11.1.32$$

$$A_{libre} = A_{cubeto} - A_{ocupada} \quad eq. 11.1.33$$

$$L = a = \sqrt{A_{cubeto}} \quad eq. 11.1.34$$

$$h = \frac{V_{tanque}}{A_{libre}} * 1.15 \quad eq. 11.1.35$$

Tabla 11.1-22. Características de los cubetos del tanque de fenol T-101.

Cubeto Fenol	
nº Tanques	1
Dexterior, Dext (m)	3.50
Distancia, Xtanc (m)	0.00
Distancia, xtanc-paret (m)	1.00
Area cubeto, Acubeto (m²)	30.25
Volumen total, Vtotal (m³)	41.37
Variable formula	1.15
Altura cubeto, hcubeto (m)	2.31
Longitud cubeto, Lcubeto (m)	5.50
Amplitud cubeto, Amcubeto (m)	5.50
Area base circular, Abc (m²)	9.62
Area ocupada, Aocupada (m²)	9.62
Area libre, Alibre (m²)	20.63

Tabla 11.1-23. Características de los cubetos del tanque de anhídrido acético.

Cubeto Anhídrido Acético	
nº Tanques	1
Dexterior, Dext (m)	3.35
Distancia, Xtanc (m)	0.00
Distancia, xtanc-paret (m)	1.00
Area cubeto, Acubeto (m²)	28.62
Volumen total, Vtotal (m³)	36.75
Variable formula	1.15
Altura cubeto, hcubeto (m)	2.13
Longitud cubeto, Lcubeto (m)	5.35
Amplitud cubeto, Amcubeto (m)	5.35
Area base circular, Abc (m²)	8.81
Area ocupada, Aocupada (m²)	8.81
Area libre, Alibre (m²)	19.81

Tabla 11.1-24. Características de los cubetos del tanque de NaOH.

Cubeto NaOH	
nº Tanques	1
Dexterior, Dext (m)	2.12
Distancia, Xtanc (m)	0.00
Distancia, xtanc-paret (m)	1.00
Area cubeto, Acubeto (m²)	16.97
Volumen total, Vtotal (m³)	8.83
Variable formula	1.15
Altura cubeto, hcubeto (m)	0.76
Longitud cubeto, Lcubeto (m)	4.12
Amplitud cubeto, Amcubeto (m)	4.12
Area base circular, Abc (m²)	3.53
Area ocupada, Aocupada (m²)	3.53
Area libre, Alibre (m²)	13.44

Tabla 11.1-25. Características de los cubetos del tanque de H₂SO₄.

Cubeto H₂SO₄	
nº Tanques	1
Dexterior, Dext (m)	3.02
Distancia, Xtanc (m)	0.00
Distancia, xtanc-paret (m)	1.00
Area cubeto, Acubeto (m²)	25.20
Volumen total, Vtotal (m³)	26.72
Variable formula	1.15
Altura cubeto, hcubeto (m)	1.70
Longitud cubeto, Lcubeto (m)	5.02
Amplitud cubeto, Amcubeto (m)	5.02
Area base circular, Abc (m²)	7.16
Area ocupada, Aocupada (m²)	7.16
Area libre, Alibre (m²)	18.04

Tabla 11.1-26. Características de los cubetos del tanque de CaO.

Cubeto CaO	
nº Tanques	1
Dexterior, Dext (m)	1.51
Distancia, Xtanc (m)	0.00
Distancia, xtanc-paret (m)	1.00
Area cubeto, Acubeto (m²)	12.32
Volumen total, Vtotal (m³)	3.26
Variable formula	1.15
Altura cubeto, hcubeto (m)	0.36
Longitud cubeto, Lcubeto (m)	3.51
Amplitud cubeto, Amcubeto (m)	3.51
Area base circular, Abc (m²)	1.79
Area ocupada, Aocupada (m²)	1.79
Area libre, Alibre (m²)	10.53

11.1.8. Tanque de almacenamiento de fenol recuperado de proceso T-701

Es un tanque con características idénticas a tanque de almacenamiento de fenol T-101, pero con un volumen reducido. Con la conversión de la reacción de carboxilación es determina que el volumen de T-701 es 13% de T-101.

Tabla 11.1-27. Dimensiones del tanque de fenol T-701

Tipo de tanque: Cónico	
Volumen fluido m3	5.38
Volumen (m3)	6.50
Densidad (kg/m3)	1070.00
Di (m)	1.77
Ri (m)	0.88
De (m)	1.78
Hc (m)	2.65
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.78
Pop (atm)	1.00
Δ P (atm)	0.27
Pd (atm)	1.47
Top (°C)	45.00
T (°C)	60.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cil (mm)	4.16
m cilindro (kg)	489.48
t fondo (mm)	8.35
h fondo (mm)	8.35
m fondo (kg)	164.95
α (°)	25
t cónico (mm)	4.88
h cónico (mm)	418.80
m cónico (kg)	247.83

V cónico (m3)	0.33
H equipo (m)	3.08
V equipo (m3)	6.90
M equipo (kg)	902.26
M equipo op (kg)	6656.83

Tabla 11.1-28. Dimensiones de la media caña del tanque de fenol T-701.

Di media caña (mm)	18.40
L media caña (m)	70.05
N espiras	13
DN	20
De media caña (cm)	2.67
D soldadura (cm)	20.03

Este tanque se encuentra con la misma condición físicos que el tanque T-101, por tanto, el espesor del aislante será el mismo de 1.34 pulgadas con un rendimiento de 93.79%.

Tabla 11.1-29. Capacidad de viento de emergencia del tanque de fenol T-701.

ΔH_{vap} (kJ/kg)	497.29
Área húmeda (m²)	12.17
Q fuego (kJ/h)	271144.72
C Viento (m³/h)	248.09

Tabla 11.1-30. Características de los cubetos del tanque de fenol T-701.

Cubeto Fenol	
nº Tanques	1
Dexterior, Dext (m)	1.78
Distancia, Xtanc (m)	0.00
Distancia, xtanc-paret (m)	1.00
Area cubeto, Acubeto (m²)	14.29
Volumen total, Vtotal (m³)	5.38

Variable formula	1.15
Altura cubeto, hcubeto (m)	0.52
Longitud cubeto, Lcubeto (m)	3.78
Amplitud cubeto, Amcubeto (m)	3.78
Area base circular, Abc (m²)	2.49
Area ocupada, Aocupada (m²)	2.49
Area libre, Alibre (m²)	11.80

11.2. Tanques de mezcla

Para nuestro proceso de producción se requieren varias etapas de mezcla de reactivos, homogenizaciones de intermedios, y tanque de precipitación. Por tanto, se necesitan recipientes diseñados dependiendo de las propiedades fisicoquímicas de las substancias (fase sólida o líquida, solubilidad, viscosidad...) y las especificaciones del proceso.

Para el diseño mecánico y las dimensiones del recipiente se ha seguido el mismo procedimiento que en el punto 11.1.3 y para el diseño de la agitación se ha hecho de la misma forma que en el punto 11.4. A continuación se detallan las especificaciones de los tanques de mezcla:

11.2.1. Mixer M-201

Es la mezcladora donde tiene lugar la reacción entre fenol y NaOH, se obtiene el fenolato de sodio como producto.



La disolución de NaOH se realiza “in situ”. Una vez llevada a cabo la reacción, se calienta la mezcladora para evaporar el agua.

Tabla 11.2-1. Dimensiones del M-201.

Tipo de tanque: Klopper	
Volumen fluido (m³)	1.00
Volumen cilindro (m³)	1.50
Densidad (kg/m³)	1500.00

Di (m)	1.08
Ri (m)	0.54
De (m)	1.09
Hc (m)	1.63
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.56
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.24
Pd (atm)	1.42
Top (° C)	100.00
T (° C)	115.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.48
Pmax cilindro (atm)	13.31
t klopper (mm)	4.76
Pmax klopper (atm)	9.80
Hklopper (m)	230.70
Vklopper (m3)	0.13
M klopper (kg)	25.38
Hequipo (m)	2.09
Vequipo (m3)	1.78
Meuipo (kg)	249.32
Meuipo op (kg)	1749.32

Tabla 11.2-2. Dimensiones de la media caña del M-201.

Di media caña (mm)	79,24
L media caña (m)	34,48
N espiras	10
DN	80
De media caña (cm)	8,89
D soldadura (cm)	8,11

Tabla 11.2-3. Agitacion del M-201.

Agitación: Pala tipo ancla			
H (m)	1.08	S1	0.95
D_t (m)	1.08	S2	0.35
D_a (m)	1.03	S3	0.25
E (m)	0.36	S4	0.20
W (m)	0.21	S5	0.10
g (m)	0.26	S6	1.00
J (m)	0.11	N (rpm)	60.00
f (m)	0.02	P real (kw)	2.05

En este mixer cuando se evaporar agua la temperatura de la mediacaña que en volta es muy alta. por tanto para garantizar su aislamiento térmico y para evitar posibles accidentes de quemadura se cubrirá de lana de roca. Su espesor se calcula con el programa Insulan de la empresa CALORCOL, en el cual se debe introducir datos de la temperatura interior del tanque (175°C), la temperatura a la superficie del aislante debe ser de 40°C, la temperatura ambiente que se ha supuesto de 25°C y la velocidad del aire que se ha supuesto 1 m/s. Así, se determina que el espesor del aislante será de 3.91 pulgadas con un rendimiento de 97.58%.

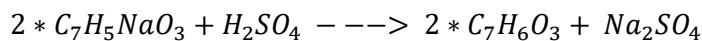
CALORCOL
·LANA MINERAL DE ROCA·

Temperatura Interior (TI)	°C	175.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°C	33.97
Temperatura Ambiente (TA)	°C	25.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	2.24
Material Superficie Aislamiento		5
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.04
Emisividad Superficie Desnuda (Ed)		0.3
Temperatura Media (TM)	°F	220.08
Coefficiente de Conductividad Térmica (k)	BTU/plg/pie ² h °F	0.32
Conductancia de la película de aire (f)	BTU/pie ² h °F	1.28
Espesor del Aislamiento recomendado (E)	plg	3.91
Pérdida de Calor por Radiación (Qr)	BTU/pie ² h	0.73
Pérdida de Calor por Convección (Qc)	BTU/pie ² h	20.0
Pérdida de Calor Total (Qt)	BTU/pie ² h	20.73
Pérdida de Calor Superficie Desnuda (Qdt)	BTU/pie ² h	858.63
Eficiencia del aislamiento (Ef)	%	97.58

Figura 11.2-1. Resultado del diseño del aislamiento del M-201.

11.2.2. Tanque de precipitación T-207

La reacción que tiene lugar en esta etapa de procesos es el siguiente:



La reacción es realiza dentro de un tanque de precipitación con agitación moderada, para mejora el rendimiento de la reacción. El diseño de equipo es basa en el código ASME de apartado 11.1.1.2, ecuaciones de apartado 11.1.2 y ecuaciones para diseño de agitador según apartado 11.4

Tabla 11.2-4. Dimensiones del T-207.

Tipo de tanque: fondo toricónico	
Volumen fluido (m³)	5.48
Volumen cilindro (m³)	8.00
Densidad (kg/m³)	1094.00
Di (m)	1.89
Ri (m)	0.95
De (m)	1.90
Hc (m)	2.84
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.58
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.00
Pd (atm)	1.50
Top (° C)	25.00
T (° C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.88
Pmax cilindro (atm)	8.31
t klopper (mm)	5.39
Pmax klopper (atm)	6.36
Hklopper (m)	390.13
Vklopper (m³)	0.68

M klopper (kg)	84.14
α (º)	30.00
t toricónico (mm)	4.91
h toricónico (mm)	1483.57
M toricónico (kg)	236.99
V toricónico (m3)	1.11
Hequipo (m)	4.71
Vequipo (m3)	9.44
Meuipo (kg)	980.26
Meuipo op (kg)	6975.38

La agitación escogida es la de tipo hojas inclinadas, ya que permiten trabajar en rango de viscosidad amplia. Y proporciona buena mezcla. El diseño de la misma es realizado a partir de las correlaciones de apartado 11.4.

Tabla 11.2-5. Agitacion del T-207.

Agitación: Hojas inclinadas			
H (m)	1.95	S1	0.33
Dt (m)	1.89	S2	1.00
Da (m)	0.62	S3	0.25
E (m)	0.62	S4	0.20
W (m)	0.12	S5	0.10
g (m)	0.16	S6	1.03
J (m)	0.19	N (rpm)	180.00
f (m)	0.04	P real (kw)	7.44

11.2.3. Tanque de homogenización M-205

Tabla 11.2-6. Dimensiones del M-205.

Tipo de tanque: Klopper	
Volumen fluido (m³)	4.53
Volumen cilindro (m³)	7.00
Densidad (kg/m³)	1034.00
Di (m)	1.81
Ri (m)	0.91
De (m)	1.82
Hc (m)	2.72
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.55
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.27
Pd (atm)	1.46
Top (° C)	100.00
T (° C)	115.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.82
Pmax cilindro (atm)	8.59
t klopper (mm)	5.30
Pmax klopper (atm)	6.54
Hklopper (m)	373.79
Vklopper (m³)	0.59
M klopper (kg)	76.09
Hequipo (m)	3.46
Vequipo (m³)	8.26
Meuipo (kg)	748.21
Meuipo op (kg)	5429.38

Los agitadores de hojas inclinadas son los más adecuados para mezclas con viscosidad moderada. Por este motivo se ha decidido diseñar un agitador tipo hojas inclinadas dimensionado a partir de las correlaciones de apartado 11.4.

Tabla 11.2-7. Agitacion del M-205.

Agitación: Hojas inclinadas			
H (m)	1.76	S1	0.33
D_t (m)	1.81	S2	1.00
D_a (m)	0.60	S3	0.25
E (m)	0.60	S4	0.20
W (m)	0.12	S5	0.10
g (m)	0.15	S6	0.97
J (m)	0.18	N (rpm)	180.00
f (m)	0.04	P real (kw)	5.96

En este tanque se mezcla el salicilato de sodio y agua, como el salicilato sale de una reacción que se lleva a cabo a 192°C aproximadamente, para evitar posibles accidentes de quemaduras se cubrirá de lana de roca. Su espesor se calcula con el programa Insulan de la empresa CALORCOL, en el cual se debe introducir datos de la temperatura interior del tanque (100°C), la temperatura a la superficie del aislante debe ser de 40°C, la temperatura ambiente, que se ha supuesto de 25°C y la velocidad del aire que se ha supuesto 1 m/s. Así, se determina que el espesor del aislante será de 1.63 pulgadas con un rendimiento de 94.10%.

Resultados - Transferencia de Calor para Superficies Planas (Calor) [1]		
CALORCOL LANA MINERAL DE ROCA		
Temperatura Interior (TI)	°C	100.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°C	33.97
Temperatura Ambiente (TA)	°C	25.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	2.24
Material Superficie Aislamiento		5
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.04
Emisividad Superficie Desnuda (Ed)		0.3
Temperatura Media (TM)	°F	152.58
Coeficiente de Conductividad Térmica (k)	BTU plg/pie ² h °F	0.29
Conductancia de la película de aire (f)	BTU/pie ² h °F	1.28
Espesor del Aislamiento recomendado (E)	plg	1.63
Pérdida de Calor por Radiación (Qr)	BTU/pie ² h	0.73
Pérdida de Calor por Convección (Qc)	BTU/pie ² h	20.0
Pérdida de Calor Total (Qt)	BTU/pie ² h	20.73
Pérdida de Calor Superficie Desnuda (Qdt)	BTU/pie ² h	351.55
Eficiencia del aislamiento (Ef)	\$	94.1

Figura 11.2-2. Resultado del diseño del aislamiento del M-205.

11.2.4. Tanque de homogenización M-302

Tabla 11.2-8. Dimensiones del M-302.

Tipo de tanque: Klopper	
Volumen fluido (m³)	6.00
Volumen cilindro (m³)	8.00
Densidad (kg/m³)	1170.00
Di (m)	1.89
Ri (m)	0.95
De (m)	1.90
Hc (m)	2.84
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.64
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.32
Pd (atm)	1.52
Top (° C)	25.00
T (° C)	40.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.89
Pmax cilindro (atm)	8.33
t klopper (mm)	5.42
Pmax klopper (atm)	6.39
Hklopper (m)	390.22
Vklopper (m³)	0.68
M klopper (kg)	84.38
Hequipo (m)	3.62
Vequipo (m³)	9.44
Meuipo (kg)	829.81
Meuipo op (kg)	7854.91

Como las propiedades físicas de la solución que trabaja en este tanque de homogenización son parecidas a las del primer tanque, se diseña la agitación de la misma tipología con el mismo procedimiento.

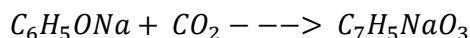
Tabla 11.2-9. Agitacion del M-302.

Agitación: Hojas inclinadas			
H (m)	2.13	S1	0.33
D_t (m)	1.89	S2	1.00
D_a (m)	0.62	S3	0.25
E (m)	0.62	S4	0.20
W (m)	0.12	S5	0.10
g (m)	0.16	S6	1.13
J (m)	0.19	N (rpm)	180.00
f (m)	0.04	P real (kw)	7.44

11.3. Diseño de reactor

11.3.1. Reactor de carboxilación R-204

La reacción que tiene lugar en esta etapa de procesos es la siguiente:



El material que se utilizará para la construcción de los reactores tendrá en cuenta la compatibilidad de los componentes en su interior. En este caso, se ha decidido utilizar "Glass-Lined" reactor para evitar el contacto directo entre el acero y los reactivos ya que la reacción se ve afectada por la presencia de hierro u otros metales (el salicilato de sodio puede quedar teñido de color).

Tabla 11.3-1. Parámetros de diseño de R-204.

Volumen de reactivos (m³)	1.90
Temperatura de proceso (°C)	192
Presión de proceso absoluto (atm)	6.00

Resultados de diseño mecánico según el código ASME, utilizan ecuaciones de apartado 11.1.1.2 y 11.1.2.

Código ASME:

Presión hidrostática:

$$\Delta P = 1500Kg/m^3 * 2.84m * 9.81 m/s^2$$

$$\Delta P = \frac{41797.90 \frac{Kg}{m}}{s^2} = 41798 Pa = 0.41 atm$$

Presión de operación y de diseño:

$$P = 1.15 * (6 + 0.41) atm$$

$$P = 7.37 atm$$

Temperatura de operación y de diseño:

$$Top = 192 ^\circ C$$

$$T = 192 + 15^{\circ}\text{C} = 207^{\circ}\text{C}$$

Espesor del cuerpo (cilíndrico):

$$t_{cilindro} = \frac{7.37 \text{ atm} * 950 \text{ mm}}{1905 \text{ atm} * 0.85 - 0.6 * 7.37 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} + 2 \text{ mm}$$

$$t_{cilindro} = 8.32 \text{ mm}$$

La presión máxima de cuerpo cilíndrico:

$$MAWP_{cilindro} = \frac{S * E * t_{cilindro}}{R + 0.6 t_{cilindro}}$$

$$MAWP_{cilindro} = \frac{1905 \text{ atm} * 0.85 * 8.32 \text{ mm}}{950 \text{ mm} + 0.6 * 8.32 \text{ mm}} = 14.16 \text{ atm}$$

Espesor del cabezal (toriesférico):

$$Si \frac{L}{r} \geq 16 * \frac{2}{3} \quad t_{cabezal} = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} + C1 + C2$$

$$L = 0.9 * Di = 0.9 * 1.89 = 1.70$$

$$r = 0.085 * L = 0.085 * 1.70 = 0.14$$

$$\frac{L}{r} = \frac{1.70}{0.14} = 11.76 > 16 * \frac{2}{3}$$

$$t_{cabezal} = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} + C1 + C2$$

$$t_{cabezal} = \frac{0.885 * 7.37 \text{ atm} * 1.70 * 1000 \text{ mm}}{1905 \text{ atm} * 0.85 - 0.1 * 7.37 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} + 2 \text{ mm}$$

$$t_{cabezal} = 10.87 \text{ mm}$$

La presión máxima de cuerpo cabezal:

$$MAWP_{cabezal} = \frac{S * E * t_{cabezal}}{0.885 * L + 0.1 * t_{cabezal}}$$

$$MAWP_{cabezal} = \frac{1905 \text{ atm} * 0.85 * 10.87 \text{ mm}}{0.885 * 1.70 * 1000 \text{ mm} + 0.1 * 10.87 \text{ mm}} = 12.82 \text{ atm}$$

Una vez calculados los espesores y presión máxima del tanque se calculan las dimensiones del tanque siguiendo las ecuaciones del apartado 11.1.2.

Altura del cabezal toriesférico

$$R = De = 1910.31 \text{ mm}$$

$$r = \frac{R}{10} = 191.03 \text{ mm}$$

$$h1 = 3.5 * t_{cabezal} = 38.06 \text{ mm}$$

$$h2 = 0.1935 * De - 0.455 * t_{cabezal} = 364.70 \text{ mm}$$

$$h_{Klopper} = h1 + h2 + t_{cabezal} = 413.63 \text{ mm}$$

Altura del equipo

$$h_{equipo} = 2 * h_{Klopper} + h_{cilindro} = 2 * \frac{413.63}{1000} \text{ m} + 2.84 \text{ m} = 3.67 \text{ m}$$

El volumen del equipo

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} Di^2 * h_{cilindro}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} 1.89^2 * 2.84 = 8.14 \text{ m}^3$$

$$V_{Klopper} = 0.1 * Di^3$$

$$V_{Klopper} = 0.1 * 1.89^3 = 0.68 \text{ m}^3$$

$$V_{equipo} = V_{cilindro} + 2 * V_{Klopper} = 9.50 \text{ m}^3$$

El peso del equipo bruto y en operación

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2) * h_{cilindro} * \rho$$

$$M_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (1.91^2 - 1.89^2) \text{ m}^2 * 2.84 \text{ m} * 7980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1127.48 \text{ kg}$$

$$M_{Klopper} = 0.1 * (De^3 - Di^3) * \rho$$

$$M_{Klopper} = 0.1 * (1.91^3 - 1.89^3) \text{ m}^3 * 7980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 144.19 \text{ kg}$$

$$M_{equipo} = M_{cilindro} + 2 * M_{Klopper}$$

$$M_{equipo} = 1127.48 + 2 * 144.19 = 1415.85 \text{ kg}$$

$$M_{operación} = M_{equipo} + V_{fluido} * \rho_{fluido}$$

$$M_{operación} = 1415.85 \text{ kg} + 1.90 \text{ m}^3 * 1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 4265.85 \text{ kg}$$

Tabla 11.3-2. Dimensiones de R-204.

Tipo de Reactor: Klopper Glass-Lined	
Volumen fluido (m3)	1.90
Volumen cilindro (m3)	8.00
Densidad (kg/m3)	1500.00
Di (m)	1.89
Ri (m)	0.95
De (m)	1.91
Hc (m)	2.84
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.20
Pop (atm)	6.00
ΔP (atm)	0.41
Pd (atm)	7.37
Top (°C)	192.00
T (°C)	207.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	8.32
Pmax cilindro (atm)	14.16
t klopper (mm)	10.87
Pmax klopper (atm)	12.82
Hklopper (m)	413.63
Vklopper (m3)	0.68
M klopper (kg)	144.19
Hequipo (m)	3.67
Vequipo (m3)	9.50
Meuipo (kg)	1415.85
Meuipo op (kg)	4265.85

La reacción de carboxilación es una reacción exotérmica, tiene una entalpia de -90.1 kJ/mol, para obtener la máxima pureza de productos y así evitar el complejo proceso de purificación. Las condiciones óptimas de trabajo son a temperatura 192-204°C y una presión absoluta de 6 bar, según la patente U.S. pat. No.4,376,867.

Por tanto, se necesita un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de la reacción dentro del rango óptimo. El mecanismo de intercambio de calor elegido es el de mediacaña. Por su alta eficacia en transferencia de calor, facilidad de instalación y buena estabilidad. El diseño de esta se realiza según los procedimientos del apartado 11.5.

A continuación, se muestra paso por paso el procedimiento:

La cantidad de calor a retirar es la suma del calor generada por la reacción y el calor consumido para evaporar el fenol formado como subproducto entre el tiempo de enfriamiento.

$$Q = \text{mols total generado} * \Delta H + \text{mols de fenol} * \Delta_{vap} H_{fenol}$$

$$Q = 14.62 * 1000 \text{ mol} * -\frac{90.1 \text{ KJ}}{\text{mol}} + 2.18 * 1000 \text{ mol} * \frac{46.8 \text{ KJ}}{\text{mol}}$$

$$Q = -1.21 * 10^6 \text{ KJ}$$

$$\text{Tiempo} = 5 \text{ h} = 5 * 3600 \text{ s}$$

$$Q = -67.48 \text{ W}$$

El coeficiente global de transmisión de calor se calcula para el caso más desfavorable, se utilizan factores de ensuciamiento típicos del agua (5556 W/m² °C) y el coeficiente individual mínimo para la mezcla y agua refrigerante.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{50} + \frac{1}{1500} + \frac{1}{5556} + \frac{1}{5556} + \frac{16.2}{0.01}$$

$$U = 46.20 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{30 - 40}{\ln(\frac{192 - 30}{192 - 40})} = -156.95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Área requerida:

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{ml}} = \frac{-67.48 \text{ W}}{46.20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ } ^\circ\text{C} * -156.95 \text{ } ^\circ\text{C}} = 9.31 \text{ m}^2$$

Sección hidráulica y diámetro interior de la mediacaña:

$$m = \frac{Q}{Cp * (T1 - T2)} = \frac{-2.43 * 10^5 \frac{KJ}{h}}{4.186 \frac{KJ}{kg \cdot ^\circ C} * (30 - 40)} = 5803.59 \frac{kg}{h}$$

$$m = 5803.59 \frac{m^3}{h} * 1000 \frac{kg}{m^3} = 5.80 \frac{m^3}{h}$$

$$S = \frac{\frac{5.8 \ m^3}{h} * \frac{1 \ h}{3600 \ s}}{1.22 \ m/s} = 1.32 * 10^{-3} \ m^2$$

$$Di = 2 * \sqrt{\frac{2 * 1.32 * 10^{-3} \ m^2}{\pi}} = 0.05802 \ m = 58.02 \ mm$$

El D exterior de la mediacaña según la estandarización que indica la figura 11.5-1, es DN 65 y la distancia libre entre media cañas para hacer soldadura.

$$L = \frac{9.31 \ m^2}{0.05802 \ m} 160.40 \ m$$

$$Nespiras = \frac{L}{\pi * 1.9 \ m} = 27$$

$$Dsoldadura = \frac{h_{cilindro} - Nespiras * De}{Nespiras - 1} = \frac{2.84 - 27 * 0.073}{27 - 1} = 0.0346 \ m = 3.46 \ cm$$

Tabla 11.3-3. Dimensiones de la media caña de R-204.

Di media caña (mm)	58.02
L media caña (m)	160.40
N espiras	27
DN	65
De media caña (cm)	7.30
D soldadura (cm)	3.46

Tabla 11.3-4. Agitacion de R-204.

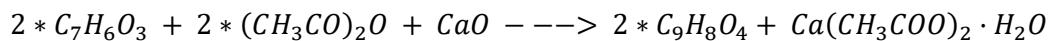
Agitación: Pala tipo ancla			
H (m)	0,67	S1	0,95
D_t (m)	1,89	S2	0,35
D_a (m)	1,80	S3	0,25
E (m)	0,62	S4	0,20
W (m)	0,36	S5	0,10
g (m)	0,45	S6	0,36
J (m)	0,19	N (rpm)	60,00
f (m)	0,04	P real (kw)	54,51

En este reactor tiene lugar una reacción exotérmica, por lo tanto, para garantizar su aislamiento térmico y para evitar posibles accidentes de quemadura se cubrirá de lana de roca. Su espesor se calcula con el programa Insulan de la empresa CALORCOL, en el cual se debe introducir datos de la temperatura interior del tanque (192°C), la temperatura a la superficie del aislante debe ser de 40°C, la temperatura ambiente, que se ha supuesto de 25°C y la velocidad del aire, que se ha supuesto 1 m/s. Así, se determina que el espesor del aislante será de 4.50 pulgadas con un rendimiento de 97.91%.

El procedimiento de diseño del espesor esta detallado, paso a paso, en el apartado 11.6. AISLAMIENTO.

11.3.2. Reactor de acetilación R-301

La reacción que tiene lugar en esta etapa del proceso es el siguiente:



Este proceso no requiere condiciones especiales de trabajo, pero si se tiene que tener en cuenta el incremento de volumen durante la reacción, que llegará a ser tres veces la de la masa inicial. Por lo tanto, se requiere un reactor con buena agitación.

Tabla 11.3-5. Parámetros de diseño de R-301.

Volumen de reactivos (m³)	0.69
Temperatura de proceso (°C)	85
Presión de proceso absoluto (atm)	Atmosférica

Resultados de diseño mecánico según el código ASME, utilizan ecuaciones de apartado 11.1.1.2 y 11.1.2.

Tabla 11.3-6. Dimensiones de R-301.

Tipo de tanque: Klopper	
Volumen fluido (m³)	0.69
Volumen cilindro (m³)	3.00
Densidad (kg/m³)	1400.00
Di (m)	1.37
Ri (m)	0.68
De (m)	1.37
Hc (m)	2.05
Hc/Di	1.50
Ocupación (%)	0.19
Pop (atm)	1.00
ΔP (atm)	0.28
Pd (atm)	1.47
Top (°C)	85.00
T (°C)	100.00
C1 (corrosión)	2.00
C2 (tolerancia)	2.00
t cilindro (mm)	4.62

Pmax cilindro (atm)	10.91
t klopper (mm)	4.99
Pmax klopper (atm)	8.16
Hklopper (m)	286.20
Vklopper (m³)	0.25
M klopper (kg)	41.53
Hequipo (m)	2.62
Vequipo (m³)	3.55
Meuipo (kg)	408.13
Meuipo op (kg)	1374.48

Tabla 11.3-7. Dimensiones de la media caña de R-301.

Di media caña (mm)	45.05
L media caña (m)	49.02
N espiras	11
DN	50
De media caña (cm)	6.03
D soldadura (cm)	0.13

Tabla 11.3-8. Agitación de R-301.

Agitación: Pala tipo ancla			
H (m)	0,47	S1	0,95
D_t (m)	1,37	S2	0,35
D_a (m)	1,30	S3	0,25
E (m)	0,45	S4	0,20
W (m)	0,26	S5	0,10
g (m)	0,32	S6	0,35
J (m)	0,14	N (rpm)	180,00
f (m)	0,03	P real (kw)	36,83

En este reactor también tiene lugar una reacción exotérmica, por lo que, para garantizar su aislamiento térmico y para evitar posibles accidentes de quemadura se cubrirá de lana de roca. Su espesor se calcula con el programa Insulan de la empresa CALORCOL, en el cual se debe introducir los datos de la temperatura interior del tanque (85°C), la

temperatura a la superficie del aislante, 40°C, la temperatura ambiente, que se ha supuesto de 25°C y la velocidad del aire, que se ha supuesto 1 m/s. Así, se determina que el espesor del aislante será de 1.23 pulgadas con un rendimiento de 92.18%.

Resultados - Transferencia de Calor para Superficies Planas (Calor) [6]

CALORCOL
·LANA MINERAL DE ROCA·

Temperatura Interior (TI)	°C	85.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°C	33.97
Temperatura Ambiente (TA)	°C	25.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	2.24
Material Superficie Aislamiento		5
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.04
Emisividad Superficie Desnuda (Ed)		0.3
Temperatura Media (TM)	°F	139.08
Coeficiente de Conductividad Térmica (K)	BTU plg/pie ² h °F	0.28
Conductancia de la película de aire (f)	BTU/pie ² h °F	1.28
Espesor del Aislamiento recomendado (E)	plg	1.23
Pérdida de Calor por Radiación (Qr)	BTU/pie ² h	0.73
Pérdida de Calor por Convección (Qc)	BTU/pie ² h	20.0
Pérdida de Calor Total (Qt)	BTU/pie ² h	20.73
Pérdida de Calor Superficie Desnuda (Qdt)	BTU/pie ² h	265.33
Eficiencia del aislamiento (Ef)	%	92.18

Figura 11.3-1. Resultado del diseño del aislamiento.

11.4. Diseño de agitación

Para que el proceso de agitación sea eficaz, el volumen del fluido agitado debe ser capaz de llegar hasta las partes más lejanas del tanque, donde la velocidad de circulación no es el único factor importante, sino que la turbulencia del fluido puede llegar a determinar la eficacia de la operación. La turbulencia es una consecuencia de que las corrientes estén adecuadamente dirigidas y que logren generar grandes gradientes de velocidad en el líquido. Todos estos parámetros consumen energía y por lo tanto es de gran importancia conocer la potencia consumida con el fin de cumplir a cabalidad los objetivos deseados. Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de potencia. Estos gráficos van a depender de las características geométricas del agitador y de la presencia o no de placas deflectoras.

11.4.1. Tipos de impulsores

Los tres principales tipos de impulsores son: de palas, turbinas y hélices. Si bien existen otros tipos, los mencionados solucionan entre un 95 y 100% de todos los problemas de agitación.

Para los procesos de la planta, se utilizan dos tipos de impulsores, que son los de palas para las reactores y turbinas para tanques de homogenización o precipitación.

11.4.1.1. De pala tipo ancla

Este tipo de impulsor se ajusta a los contornos interiores de las paredes del tanque, girando por esta superficie con una muy pequeña holgura como muestra la figura 11.4-1. Previenen la adhesión de materiales sólidos pegañosos sobre su superficie y originan una buena transferencia de calor con las paredes. El impulsor que se usará para los reactores es el ISOPAS de la empresa ETAKO, especialmente desarrollado para procesar medios pastosos y poco fluidos, creando una excelente mezcla axial y una eficiente transferencia de calor. También es utilizado en mezcladores/secaderos de sólidos.

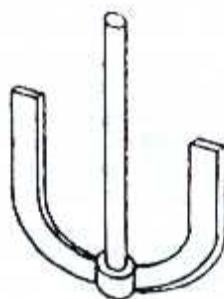


Figura 11.4-1. Agitador tipo ancla.



Figura 11.4-2. Agitador ISOPAS de empresa EKATO.

11.4.1.2. De turbina tipo hojas inclinadas

Este tipo de impulsor combina flujo radial con flujo axial como muestra la figura 11.4-3. se utiliza especialmente para homogeneizar y mejorar la transferencia de calor con las paredes o serpentines dispuestos en el interior del tanque. Se consideran velocidades medias de 100 a 300 rpm y elevadas de 300 a 1000 rpm.

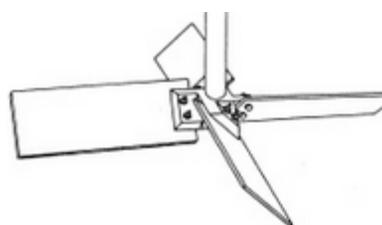


Figura 11.4-3. Agitador tipo turbina hojas inclinadas.

11.4.2. Números adimensionales

11.4.2.1. Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido. Relaciona densidad, viscosidad, velocidad y la dimensión típica de un flujo. La presencia o ausencia de turbulencia en un fluido que se agita se puede relacionar con un número de Reynolds. Su ecuación es:

$$Re = \frac{N d^2 \rho}{\mu} \quad eq. 11.4.1$$

Donde:

- N: velocidad de rotación [rps]
- d: diámetro del agitador [m]
- ρ: densidad del fluido [kg/m³]
- μ: viscosidad [Pa·s]

El valor del número de Reynolds define si el carácter del fluido es turbulento o laminar. Además, se considera que el paso entre el régimen laminar y el turbulento no es inmediato, pasando por una zona de transición. Se define de la siguiente manera:

Régimen laminar: $Re < 10$

Régimen transitorio: $300 < Re < 10000$

Régimen turbulento: $Re > 10000$

11.4.2.2. Número de potencia (Np)

El número de Potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia. Cuando el tanque contiene placas deflectoras, el Np tiene una buena correlación con el número de Reynolds. Cuando existe régimen turbulento, Np tiene valor constante. Su ecuación es:

$$Np = \frac{P}{N^3 d^5 \rho} \quad eq. 11.4.2$$

Donde:

- P: potencia de agitación del impulsor (watts)
- N: velocidad de rotación [rps]
- d: diámetro del agitador [m]
- ρ: densidad del fluido [kg/m³]
- μ: viscosidad [Pa·s]

11.4.2.3. Número de Froude (Fr)

El número de Froude es una medida que relaciona la fuerza de inercia y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Se utiliza en el cálculo del consumo de potencia cuando el fluido del tanque mantenga un movimiento de ondas importante a causa de la falta de placas deflectoras.

$$Fr = \frac{N^2 d}{g} \quad eq. 11.4.3$$

Donde:

- g: aceleración de gravedad
- N: velocidad de rotación [rps]
- d: diámetro del agitador [m]

11.4.3. Consumo de potencia mediante N_p

Utilizando el gráfico de la figura 11.4-4 se determina el número de potencia (N_p) mediante la interpolación con el número de Reynolds calculado.

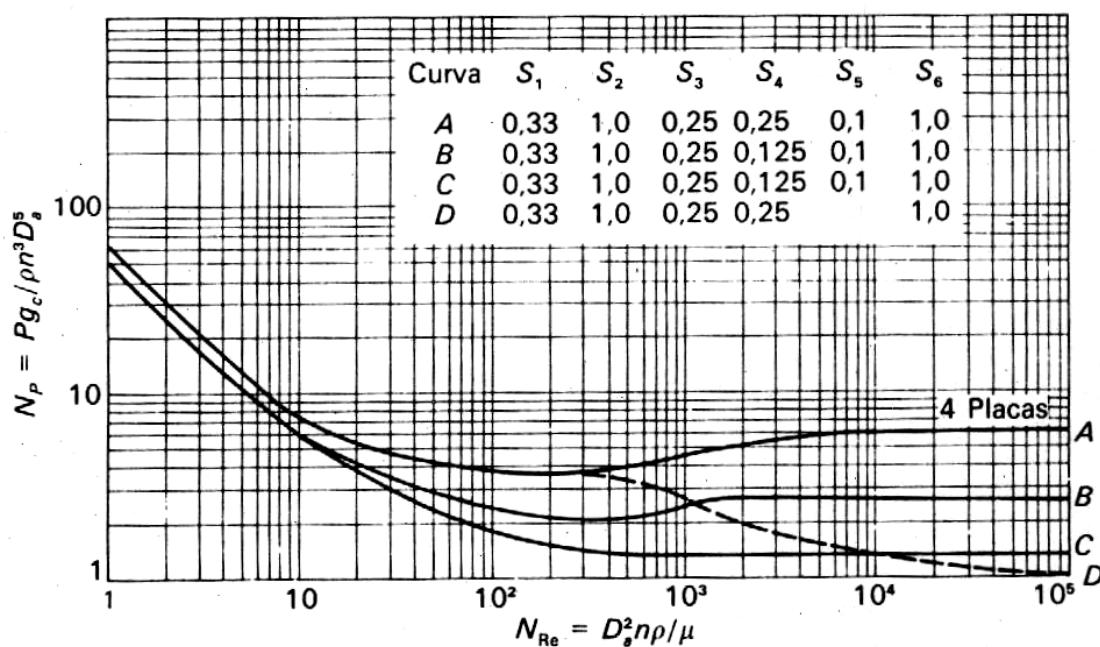


Figura 11.4-4. N_p vs Re .

La curva A se utiliza para palas verticales del impulsor, La curva B y C para palas verticales y estrechas, la curva D se utiliza en un estanque que no posee placas deflectoras.

Su ecuación es:

$$P = Np * N^3 * d^5 * \rho \quad \text{eq. 11.4.4}$$

Donde:

- P: potencia de agitación del impulsor (watts)
- N: velocidad de rotación [rps]
- d: diámetro del agitador [m]
- ρ : densidad del fluido [kg/m³]
- μ : viscosidad [Pa·s]

Ejemplo de cálculo del consumo de potencia de agitación del tanque de precipitación por correlación gráfica de N_p .

Datos:

Densidad mezcla (ρ)= 1500 kg/m³

Viscosidad (μ)= 0.005 Pa·s

Velocidad angular (N)= 180rpm=3 rps

Diámetro del agitador (d)= 1300 mm =0.6 m

Reemplazando:

$$Re = \frac{3 * 0.6^2 * 1500}{0.005} = 321525.18$$

El número de potencia (Np) mediante el gráfico

$$Np = 1$$

Luego se puede calcular la potencia despejando P con la ecuación 11.4.4.

$$P = Np * N^3 * d^5 * \rho$$

$$P = 1 * 3^3 * 0.6^5 * 1500 = 3090 \text{ w} = 3.09 \text{ kw}$$

Consideraciones:

Eficiencia del motor = 0.7

Pérdidas por fricción= 35%

$$P = 3.09 * \frac{1.35}{0.7} = 5.96 \text{ kw}$$

11.4.4. Consumo de potencia para nº de Re <300 con o sin placas deflectoras

Para este caso con $Re < 300$, las líneas de Np v/s Re coinciden para un tanque con o sin placas deflectoras. En este intervalo el flujo es laminar y la densidad no influye. La ecuación de potencia queda de la siguiente manera:

$$P = KL * N^2 * d^3 * \mu \quad \text{eq. 11.4.5}$$

Donde:

- N: velocidad de rotación [rps]
- d: diámetro del agitador [m]
- KL: constante
- μ : viscosidad [Pa·s]

Tabla 11.4-1. KL vs tipo de impulsor.

Tipo de impulsor	KL
Hélice paso cuadrado, tres palas	41.0
Hélice paso de 2, tres palas	43,5
Turbina, seis palas planas	71,0
Turbina, seis palas curvas	70,0
Turbina de ventilador, seis palas	70,0
Turbina dos palas planas	36,5
Turbina cerrada, seis palas curvas	97,2

Ejemplo de cálculo de consumo de potencia de agitación de reactor de acetilación R-301 según apartado 11.4.3 para $Re < 300$.

Datos:

Densidad mezcla (ρ)= 500 kg/m³

Viscosidad (μ)= 10 Pa·s

Velocidad angular (N)= 180rpm=3 rps

Diámetro del agitador (d)= 1300 mm =1.3 m

Reemplazando:

$$Re = \frac{3 * 1.3^2 * 500}{10} = 252.44$$

Luego se puede calcular la potencia despejando P con la ecuación 11.4.5:

$$P = KL * N^2 * d^3 * \mu$$

$$P = 97.2 * 3^2 * 1.3^3 * 10 = 19100 \text{ w} = 19.10 \text{ kw}$$

Consideraciones:

Eficiencia del motor = 0.7

Pérdidas por fricción= 35%

$$P = 19.10 * \frac{1.35}{0.7} = 36.83 \text{ kw}$$

11.5. Diseño de media caña

El método más utilizado para calentar o enfriar el reactor en industria química es el intercambio de calor por medio de camisa o media caña. Para nuestro proceso se ha elegido un modelo de media caña ya que permite una velocidad de circulación más elevada y un mayor gradiente de la temperatura. Estos factores favorecen la transferencia de calor.

11.5.1. Determinar Q

El primer paso es determinar la cantidad de calor por unidad de tiempo que hay que eliminar o suministrar al sistema. Según el proceso que tiene en lugar se puede calcular con las ecuaciones siguientes:

$$Q = r * \Delta H \quad \text{eq. 11.5.1}$$

$$Q = \text{mol total generado} * \Delta H \quad \text{eq. 11.5.2}$$

Donde:

- Q: caudal de calor [kJ/s] o [kJ]
- r: velocidad de reacción [mol/s]
- ΔH : entalpia [kJ/mol]

$$Q = m * Cp * \Delta T \quad \text{eq. 11.5.3}$$

Donde:

- Q: caudal de calor [kJ/h]
- m: caudal másico [kg/h]
- ΔT : salto térmico [°C]
- Cp: calor específica [kJ/kg °C]

$$Q = n * \lambda_v \quad \text{eq. 11.5.4}$$

Donde:

- Q: calor [kJ]
- N: mols de la sustancia [mol]

-
- λ_v : calor latente de vaporización [KJ/mol]

11.5.2. Coeficiente global de transmisión de calor

Este valor se puede encontrar en datos bibliográficos, utilizan valores típicos o calcular con la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{f_{fi}} + \frac{1}{f_{fe}} + \frac{\Delta x}{k} \quad \text{eq. 11.5.5}$$

Donde:

- U: coeficiente global de transmisión de calor [w / m² °C]
- h_i: coeficiente individual de transmisión de calor interior [w / m² °C]
- h_e: coeficiente individual de transmisión de calor exterior [w / m² °C]
- f_{fi}: factor de ensuciamiento interior [w / m² °C]
- f_{fe}: factor de ensuciamiento exterior [w / m² °C]
- k: conductividad térmica (w / m °C)
- Δx: espesor de la pared (m)

11.5.3. Área de transmisión de calor

A continuación, se calcula el área de calefacción de la media caña. La ecuación es el siguiente:

$$Q = U * A * \Delta T_{ml} \quad \text{eq. 11.5.6}$$

Donde:

- Q: caudal de calor [w]
- U: coeficiente global de transmisión de calor [w / m² °C]
- A: área de transmisión de calor [m²]
- ΔT_{ml}: temperatura media logarítmica [°C]

$$\Delta T_{ml} = \frac{T1 - T2}{\ln(\frac{Ts - T2}{Ts - T1})} \quad eq. 11.5.7$$

Donde:

- T1: temperatura de fluido de la entrada [°C]
- T2: temperatura de fluido de la salida [°C]
- Ts: temperatura de la superficie de intercambio [°C]

11.5.4. Sección hidráulica

Ahora suponiendo una velocidad normal del refrigerante/calentador de 4ft/s (1.22m/s) se puede calcular el área circular de la media caña, utilizando la siguiente relación:

$$S = \frac{m}{v} \quad eq. 11.5.8$$

Donde:

- m: caudal de fluido (m³/s)
- v: velocidad de circulación (m/s)
- S: sección hidráulica (m²)

11.5.5. Diámetro interior de la mediacaña

Sabiendo el área de paso, se puede calcular el diámetro interior de la media caña de la siguiente manera:

$$S = \frac{1}{2} * \frac{\pi}{4} * Di^2 \quad eq. 11.5.9$$

Aislando Di de la ecuación 11.5.8, resulta la ecuación siguiente:

$$Di = 2 * \sqrt{\frac{2 * S}{\pi}} \quad eq. 11.5.10$$

11.5.6. Diámetro exterior de la mediacaña

El diámetro exterior o el espesor de la media caña es determina mediante la estandarización de la tubería.

Nominal size		OD mm	Welded & Seamless Carbon Steel Pipe to ASME B36.10M All dimensions are in mm												
DN	NPS		Schedule												
			10	20	30	40	Std	60	80	XS	100	120	140	160	XXS
6	1/8	10.3	1.24	1.45	1.73	1.73		2.41	2.41						
8	1/4	13.7	1.65	1.85	2.24	2.24		3.02	3.02						
10	3/8	17.1	1.65	1.85	2.31	2.31		3.20	3.20						
15	1/2	21.3	2.11	2.41	2.77	2.77		3.73	3.73						
20	3/4	26.7	2.11	2.41	2.87	2.87		3.91	3.91						
25	1	33.4	2.77	2.90	3.38	3.38		4.55	4.55						
32	1 1/4	42.2	2.77	2.97	3.56	3.56		4.85	4.85						
40	1 1/2	48.3	2.77	3.18	3.68	3.68		5.08	5.08						
50	2	60.3	2.77	3.18	3.91	3.91		5.54	5.54						
65	2 1/2	73.0	3.05	4.78	5.16	5.16		7.01	7.01						
80	3	88.9	3.05	4.78	5.49	5.49		7.62	7.62						
90	3 1/2	101.6	3.05	4.78	5.74	5.74		8.08	8.08						
100	4	114.3	3.05	4.78	6.02	6.02		8.56	8.56						
125	5	141.3	3.40		6.55	6.55		9.53	9.53						
150	6	168.3	3.40		7.11	7.11		10.97	10.97						
200	8	219.1	3.76	6.35	7.04	8.18	10.31	12.70	12.70	15.09	18.26	20.62	23.01	22.23	
250	10	273.0	4.19	6.35	7.80	9.27	9.27	12.70	15.09	12.70	18.26	21.44	25.40	26.58	
300	12	323.8	4.57	6.35	8.38	10.31	9.53	14.27	17.48	12.70	21.44	25.40	28.58	33.32	
350	14	355.6	6.35	7.92	9.53	11.13	9.53	15.09	19.05	12.70	23.83	27.79	31.75	35.71	
400	16	406.4	6.35	7.92	9.53	12.70	9.53	16.66	21.44	12.70	26.19	30.96	36.53	40.49	
450	18	457	6.35	7.92	11.13	14.27	9.53	19.05	23.83	12.70	29.36	34.93	39.67	45.24	
500	20	508	6.35	9.53	12.70	15.09	9.53	20.62	25.19	12.70	32.54	38.10	44.45	50.01	
550	22	559	6.35	9.53	12.70	9.53	22.23	28.58	12.70	34.93	41.28	47.63	53.98		
600	24	610	6.35	9.53	14.27	17.48	9.53	24.61	30.96	12.70	38.89	46.02	52.37	59.54	
650	26	660	7.92	12.70		9.53									
700	28	711	7.92	12.70	15.88		9.53								
750	30	762	7.92	12.70	15.88		9.53								
800	32	813	7.92	12.70	15.88	17.48	9.53								
850	34	864	7.92	12.70	15.88	17.48	9.53								
900	36	914	7.92	12.70	15.88	19.05	9.53								
950	38		965				9.53								
1000	40	1016					9.53								
1050	42	1067					9.53								
1100	44	1118					9.53								
1150	46	1168					9.53								
1200	48	1219					9.53								

Note 1: For dimensional tolerances refer to ASME B36.10M

Equivalent sizes shown in API Specification 5L

en 1

Figura 11.5-1. Diametro nominal de tuberías de aceros estandarizada.

Ya que se conoce el área requerida y el diámetro interior de la media caña, se puede calcular longitud de la caña necesaria para cumplir el área de intercambio.

$$L = \frac{A}{Di} \quad \text{eq. 11.5.11}$$

Donde:

- L: longitud total de la caña (m)
- Di: diámetro interior de la media caña (m)
- A: área de transmisión de calor (m²)

Para saber el número de espiras necesarias se divide la longitud total de la caña necesaria entre el perímetro del recipiente.

$$N_{\text{espiras}} = \frac{L}{\pi * D_{\text{exterior}}} \quad \text{eq. 11.5.12}$$

Donde:

- L: longitud total de la caña (m)
- Nespiras: el número de espiras necesarias
- Dexterior: diámetro exterior del recipiente (m)

11.5.7. Distancias libres entre mediacañas

Finalmente, para calcular las distancias libres entre medias cañas y comprobar que no hay problemas de espacio en la disposición de las espiras a lo largo del tanque, se aplica la siguiente expresión.

$$D_{soldadura} = \frac{h_{cilindro} - N_{espiras} * De}{N_{espiras} - 1} \quad eq. 11.5.13$$

Donde:

- $D_{soldadura}$: distancias libres entre media cañas (m)
- $h_{cilindro}$: altura del cuerpo cilindro (m)
- $N_{espiras}$: el número de espiras necesarias
- De : diámetro exterior de la media caña (m)

11.6. Aislamiento

Para calcular el espesor de aislamiento se utiliza el programa Insulan de la empresa CALORCOL.S.A. con información de material, temperaturas y materia de aislante el programa se da el valor de espesor óptimo.

A continuación, se muestra mediante gráficas, los procesos de determinación del espesor del aislante, mediante dicho programa.



Figura 11.6-1. Selección de la materia que envuelve la lana de roca por fuera.

Consulta de Acabados Superficiales

CALORCOL
LANA MINERAL DE ROCA

Tipo de Consulta

Consultar por: 1. Código

Criterio: Igual a

Resultados

Código	Descripción	Emisividad	Temperatura (°F)
1	ACERO	0.8	
2	ACERO INOXIDABLE	0.3	
3	COBRE	0.6	
4	PVC	0.9	

Figura 11.6-2. La materia del equipo aislante.

Cálculo de Espesores Óptimos - Pérdida de Calor - Equipos [1]

CALORCOL
LANA MINERAL DE ROCA

Mantas Aislantes de 100 kg/m³

Datos de Entrada

Temperatura Interior:	192	°C
Temperatura Superficie Aislamiento:	40	°C
Temperatura Ambiente:	25	°C
Velocidad del Aire:	1	m/s
Superficie Exterior Aislamiento:	5	.04
Superficie Desnuda:	2	.3

Código Material : Emisividad:

Figura 11.6-3. La entrada de datos.

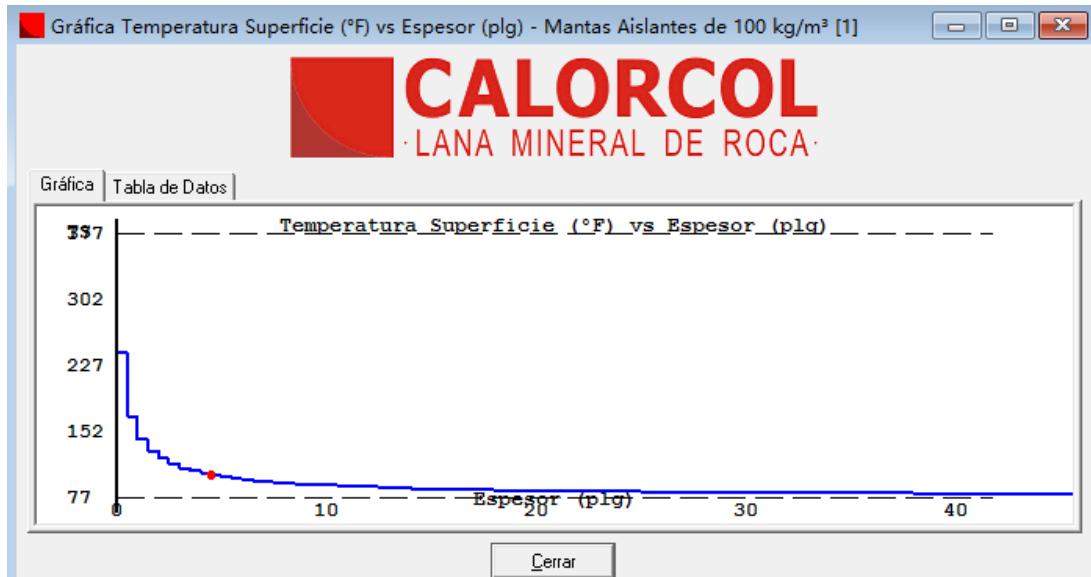


Figura 11.6-4. La grafica de la temperatura ($^{\circ}$ F) vs espesor (plg).

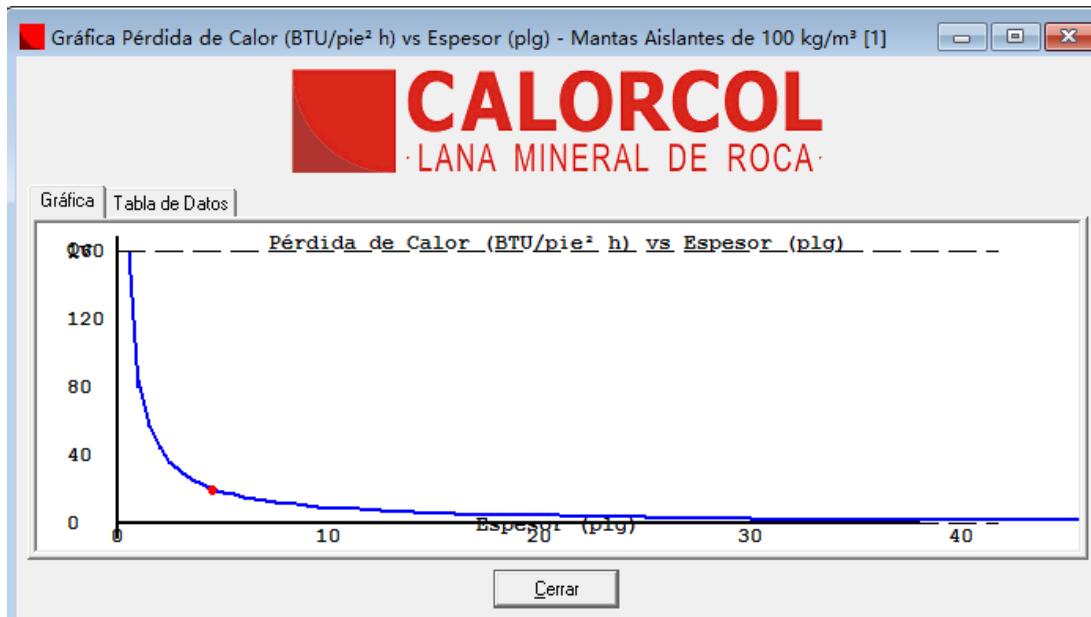


Figura 11.6-5. La grafica de la perdida de calor (BTU / plg² h) vs espesor (plg).

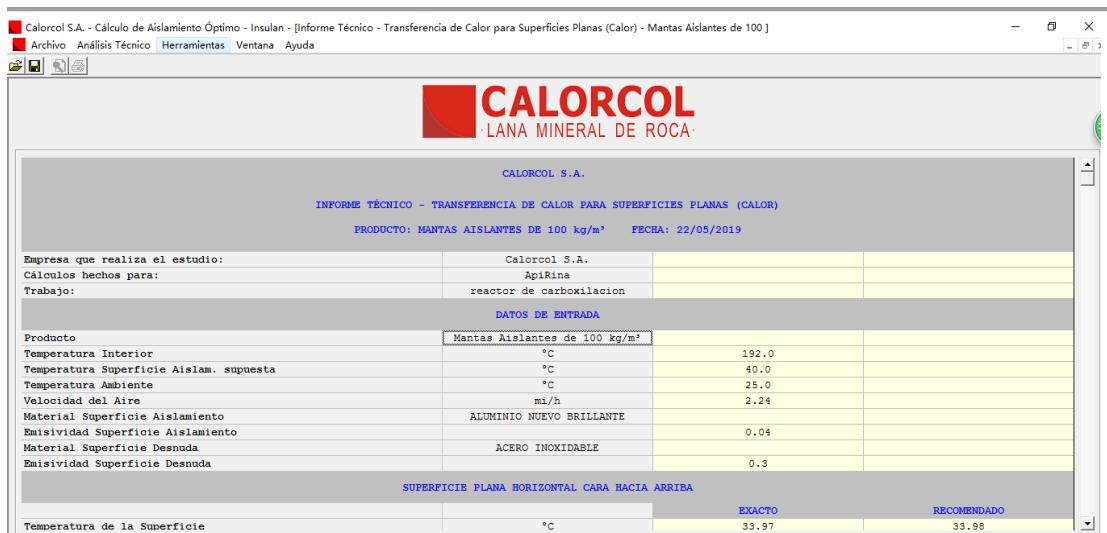


Figura 11.6-6. El informe tecnico del diseño parte 1/3.

SUPERFICIE PLANA HORIZONTAL CARA HACIA ARRIBA			
		EXACTO	RECOMENDADO
Temperatura de la Superficie	°C	33.97	33.98
Temperatura Media	°C	235.38	235.38
Coeficiente de Conductividad Térmica	BTU plg/pie ² h °F	0.33	0.33
Conductancia de la película de aire	BTU/pie ² h °F	1.28	1.28
ESPESOR DEL AISLAMIENTO	plg	4.5	4.5
Pérdida de Calor por Radiación	BTU/pie ² h	0.73	0.73
Pérdida de Calor por Convección	BTU/pie ² h	20.0	20.01
Pérdida de Calor Total	BTU/pie ² h	20.73	20.74
Pérdida de Calor Superficie Desnuda	BTU/pie ² h	990.08	990.08
Eficiencia del Aislamiento	%	97.91	97.91
SUPERFICIE PLANA VERTICAL			
		EXACTO	RECOMENDADO
Temperatura de la Superficie	°C	35.81	35.73
Temperatura Media	°C	237.03	236.96
Coeficiente de Conductividad Térmica	BTU plg/pie ² h °F	0.33	0.33
Conductancia de la película de aire	BTU/pie ² h °F	1.07	1.06
ESPESOR DEL AISLAMIENTO	plg	4.46	4.5
Pérdida de Calor por Radiación	BTU/pie ² h	0.88	0.88
Pérdida de Calor por Convección	BTU/pie ² h	19.86	19.67
Pérdida de Calor Total	BTU/pie ² h	20.74	20.55

Figura 11.6-7. El informe tecnico del diseño parte 2/3.

SUPERFICIE PLANA HORIZONTAL CARA HACIA ABAJO			
		EXACTO	RECOMENDADO
Temperatura de la Superficie	°C	40.18	39.82
Temperatura Media	°C	240.96	240.64
Coeficiente de Conductividad Térmica	BTU plg/pie ² h °F	0.33	0.33
Conductancia de la película de aire	BTU/pie ² h °F	0.76	0.76
ESPESOR DEL AISLAMIENTO	plg	4.37	4.5
Pérdida de Calor por Radiación	BTU/pie ² h	1.27	1.24
Pérdida de Calor por Convección	BTU/pie ² h	19.46	18.88
Pérdida de Calor Total	BTU/pie ² h	20.73	20.11
Pérdida de Calor Superficie Desnuda	BTU/pie ² h	602.36	602.36
Eficiencia del Aislamiento	%	96.56	96.66

Figura 11.6-8. El informe tecnico del diseño parte 3/3.

11.7. Columna de adsorción de carbón activado

Durante la reacción de carboxilación el producto puede salir tintado. Con el fin de eliminar el color del producto, se diluye en agua y pasa por una columna de adsorción de GAC (Carbón Activado Granular). Para una producción diaria de 10 toneladas de aspirina, la cantidad de carbón activado requerido son 200kg, además de 100 kg de Zn y 200kg de ZnSO₄ que serán utilizados para aumentar la eficacia de este proceso. La columna tendrá características siguientes:

Tabla 11.7-1. Características de la columna de carbon activado.

volumen que tratar (m³)	4,53
tiempos (min)	60
Volumen Columna (m³)	1
Volumen Columna libre (m³)	0,5
caudal a tratar (m³/min)	0,08
caudal a tratar (L/min)	75,5
v típico (m/min)	0,10
v típico (mm/s)	1,60
longitud (m)	1,27
A paso (m²)	0,79
Di columna (m)	0,5

11.8. Intercambiadores de calor

En la planta hay necesidad de enfriamiento y calentamiento de las corrientes de proceso, equipos o tanques. Estas necesidades se consiguen satisfacer mediante varios intercambiadores de calor.

Se ha elegido los intercambiadores del tipo carcasa y tubos ya que su configuración permite una gran área de intercambio en un volumen reducido, su diseño se puede adaptar para cualquier condición de operación (buena conformación para operaciones a altas presiones), utiliza técnicas de fabricación muy establecidas, pueden ser construidos de un amplio rango de materiales y son fáciles de limpiar.

Las características de diseño mecánico, fabricación, materiales, y las pruebas de la carcasa y los tubos de los intercambiadores de calor están bajo la clase B del código TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association). Ya que es el que adapta para proceso químicos.

Para el diseño de los intercambiadores de calor de carcasa y tubos se ha usado el simulador utilizado es Aspen Exchanger Design & Rating V10, un módulo del simulador de procesos AspenOne® de la casa comercial AspenTech. Está esencialmente enfocado a ingeniería de procesos y optimización. Desde un punto de vista de diseño, el software permite la realización tanto del diseño térmico como del diseño mecánico de diferentes tipos de intercambiadores (carcasa y tubos, placas, torres de refrigeración ...)

En este programa tan solo es necesario introducir los datos del corriente de entrada y salida que se desea enfriar o calentar y los datos de entrada y salida del corriente del refrigerante, del cual el programa puede calcular el caudal que se requiere de éste. Estableciendo las composiciones de los dos corrientes, el programa calcula como afecta a las propiedades de los fluidos los cambios de temperatura y presión.

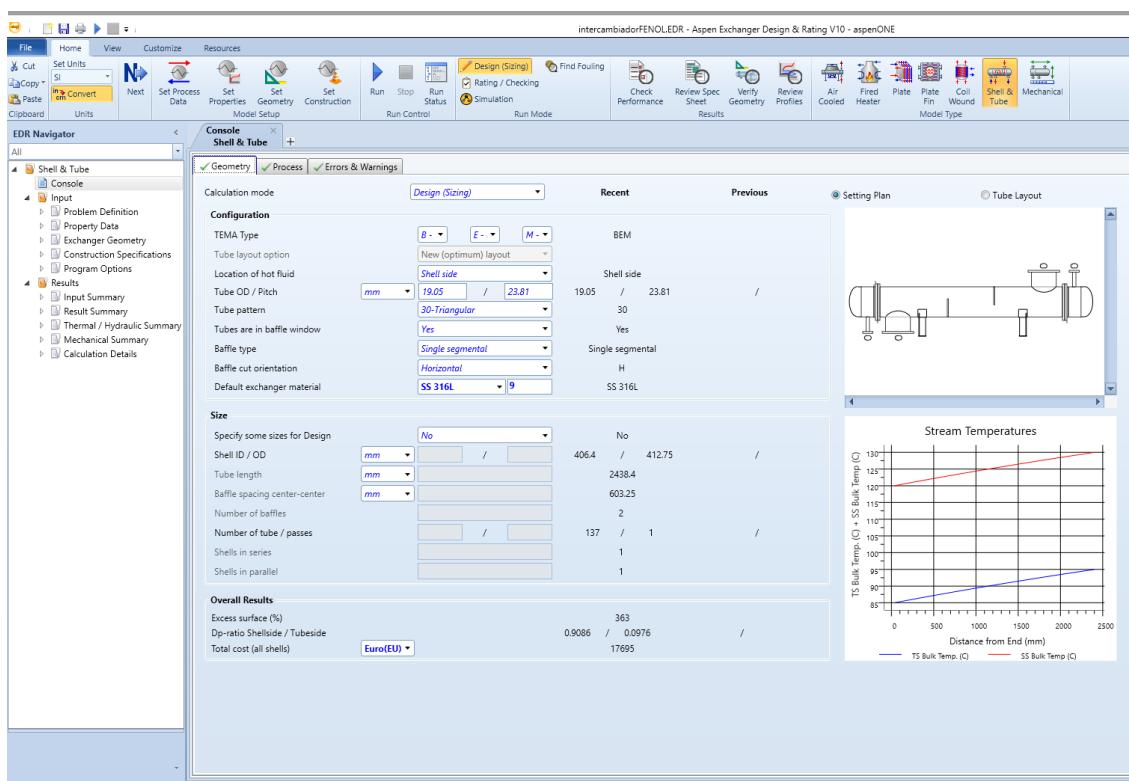


Figura 11.8-1. Pantalla principal de Aspen Exchanger Design & Rating V10

11.9. Bombas

Para el diseño y selección de bombas es necesario calcular la potencia que debe suministrar esta para transportar el fluido entre dos puntos de la planta. Para determinar la potencia necesaria de la bomba se realiza un balance de energía mecánica entre los puntos inicial y final de desplazamiento del fluido, teniendo en cuenta también las presiones iniciales y finales de la tubería.

11.9.1. Balance de energía mecánica

$$\frac{\Delta P}{\rho} * g * (Z_2 - Z_1) + \frac{1}{2 \alpha} * (v_2^2 - v_1^2) = \hat{w} - e_v \quad \text{eq. 11.9.1}$$

Donde:

- ΔP : diferencia de presión entre los dos puntos de la línea
- ρ : densidad (kg/m³)
- g : aceleración de la gravedad (m/s²)
- Z : altura del líquido en los dos puntos (m)
- α : depende del Reynolds, para $Re < 2100$ $\alpha = 0.5$ y $Re > 2100$ $\alpha = 1$
- \hat{w} : trabajo de la bomba por unidad (J/kg)
- e_v : Perdidas de trabajo por fricción ($e_{vrec} + e_{vac}$)

11.9.2. Cálculo pérdidas de carga en tramos rectos

Las pérdidas de carga que experimenta el fluido en los tramos rectos de instalación son debidas a la fricción del fluido entre las paredes de la tubería y la turbulencia de este. Aplicando un balance macroscópico de cantidad de movimiento en el sistema obtiene la siguiente expresión:

$$e_{vrec} = 2 * f * v^2 * \frac{L}{D} \quad \text{eq. 11.9.2}$$

Donde:

- f : factor de fanning
- L : longitud (m)
- D : diámetro de tubería (m/s²)
- V : velocidad del fluido (m/s)

El factor de fricciones depende del Reynolds y de la rugosidad relativa, parámetros característicos del material de la conducción. El número de Reynolds se determina con la siguiente expresión:

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu} \quad \text{eq. 11.9.3}$$

Donde:

- D: diámetro de tubería (m/s²)
- v: velocidad del fluido (m/s)
- ρ: densidad (kg/m³)
- μ: viscosidad del fluido (Kg/m·s)

Una vez determinado el Reynolds y la rugosidad relativa, se determina el factor de fricción con el grafico de Moody.

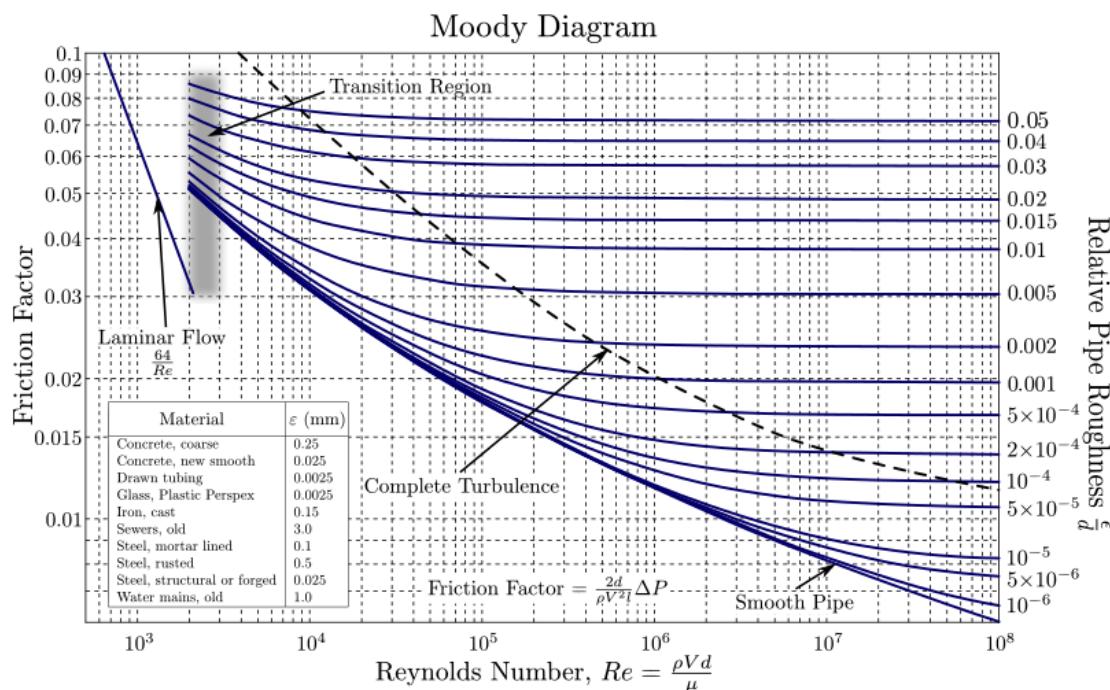


Figura 11.9-1. Representación del diagrama de Moody

11.9.3. Cálculo pérdidas de carga en accidentes

Durante el recorrido el fluido experimenta una pérdida de carga en diferentes accesorios o accidentes que distorsionan el recorrido del fluido. Los accidentes característicos de una instalación como ésta son codos, válvulas, reducciones de diámetro, filtros, etc.

se utiliza el método de los coeficientes de pérdidas (K) para determinar las pérdidas de carga en accidentes.

$$e_{\nu} ac = \sum K * \frac{v^2}{2} \quad eq. 11.9.4$$

Donde:

- K: constante específica del accidente
- v: velocidad del fluido (m/s)

En la siguiente tabla representa los valores típicos de K para los diferentes accesorios:

Tabla 11.9-1. la constante K.

ACCIDENT	K
Entrada/sortida circuit	
Entrada encanizada	0,78
Entrada cantells vius	0,50
Entrada arrodonida	0,04
Sortida encanizada	1,00
Sortida cantells vius	1,00
Sortida arrodonida	1,00
Colzes/ Unions	
Colze de 45º standard	0,35
Colze de 45º gran curvatura	0,20
Colze de 90º standard	0,75
Colze de 90º gran curvatura	0,45
Colze de 90º petita curvatura	1,3
Corba de 180º	1,5
T standard ús com a colze	1,0
T standard amb bifurcació tancada	0,4
T standard amb divisió de cabal	1,0 (a)
Unió roscada	0,04
Maneguet d'unió	0,04
Vàlvula comporta	
oberta	0,17
¾ oberta	0,90
½ oberta	4,5
¼ oberta	24,0
Caballimetros mecànics	
de disc	7,0
de pistó	15,0
rotatori	10,0
de turbina	6,0

ACCIDENT	K
Vàlvula de diafragma	
oberta	2,3
¾ oberta	2,6
½ oberta	4,3
¼ oberta	21,0
Vàlvula de seient	
oberta	9,0
¾ oberta	13,0
½ oberta	36,0
¼ oberta	112,0
Vàlvula angular oberta	2,0
Vàlvula de bola	
oberta	0,05
20º	1,56
40º	17,3
60º	206,0
Vàlvula de papallona	
oberta	0,24
20º	1,54
40º	10,8
60º	118,0
Vàlvula de retenció (oberta)	
de frontissa (columpio, charnera)	2,0
de bola	70,0
de disc	10,0
Canvi de diàmetre	
Estretament/	** (b)
Eixamplament	** (b)

** $\left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2$ essent D_1 el diàmetre del tub petit i D_2 el diàmetre del tub gran.

11.9.4. Cálculo potencia de la bomba

Una vez determinada la pérdida de carga total y conociendo el término de potencial, se llega a la relación entre el trabajo de la bomba por unidad de masa y potencia de esta, dando paso a la siguiente expresión;

$$P_{teórica} = \hat{w} * m \quad eq. 11.9.5$$

$$P_{real} = \frac{P_{teórica}}{\eta} \quad eq. 11.9.6$$

Donde:

- \hat{w} : trabajo de la bomba por unidad (J/kg)
- m : caudal masico del fluido a impulsar (Kg/s)
- η : rendimiento de la bomba (0.75)

11.10. Compresores

Para desplazar fluidos en estado gas como CO₂ se utilizan compresores. Cabe destacar que la energía mecánica se transforma en cinética en llegar al fluido. Como consecuencia de producirse un cambio importante en la presión del gas, también se produce un cambio en la temperatura y la densidad del gas o vapor. Se ha considerado que la compresión es politrópica vez de realizar los cálculos para determinar la potencia de cada compresor utilizando la siguiente expresión:

$$W_p = N \frac{Y}{(Y-1)} \frac{Z R T}{PM} (r^{\frac{Y-1}{Y-10}} - 1) \quad \text{eq. 11.10.1}$$

$$W = W_p * m \quad \text{eq. 11.9.8}$$

Donde:

- $\gamma = C_p / C_v$
- PM: el peso molecular del fluido (kg / kmol)
- R: la constante de los gases (8.31 KJ / K · kmol)
- T: la temperatura del fluido
- R: el factor de relación de presiones (P₂ / P₁)
- W_p: la potencia por unidad másica (kJ / kg)
- m: el caudal másico (kg / s)
- w: la potencia real del equipo (kW)

11.11. Sala blanca

El parámetro más importante para diseñar la sala blanca es el caudal de aire. Y es calcula de siguiente manera:

En primer lugar, es calcular el volumen de la sala:

$$V = A * h \quad \text{eq. 11.11.1}$$

Donde:

- V: volumen (m³)
- A: superficie de la sala (m²)
- h: altura interior de la sala (m)

una vez determinado el volumen, es multiplicar por número de renovación de aire según la clasificación de la sala. En ese caso es 20 renovación por hora.

$$Q = \frac{1}{0.8} * V * \frac{20}{h} \quad \text{eq. 11.11.2}$$

Donde:

- V: volumen (m³)
- Q: caudal de aire (m³/h)

Como las salas no están cerrados herméticamente entre el pasillo y alguno con externo. Para evitar contaminación, se aumenta ligeramente la presión interior de la sala. Según la diferencia de presión que tienen, habrá infiltración o exfiltración, es calcular con la ecuación siguiente:

$$Q = A * \alpha * \sqrt{\Delta P} \quad \text{eq. 11.11.3}$$

Donde:

- Q: caudal de aire (m³/h)
- A: área de filtración (m²)
- ΔP : diferencia de presión (pa)
- α : coeficiente de descarga (0.85)

$$Q_{suministrado} = Q_{requerido} + Q_{infiltación} - Q_{exfiltración} \quad \text{eq. 11.11.4}$$

$$Q_{retorno} = Q_{suministrado} - Q_{exfiltración} \quad \text{eq. 11.11.5}$$

11.12. BIBLIOGRAFÍA

- API STANDARD 650: Welded Tanks for Oil Storage 11^a edition, June 2007.
- ASME Code Sec VIII Div 1
- McCABE Warren, SMITH Julian C., HARRIOTT Peter, Operaciones unitarias en Ingeniería química 4^a ed. Madrid, McGraw-Hill, 1991. 1111p.
- SHIGLEY Edward, El proyecto en ingeniería mecánica. EEUU, 1^a ed. McGraw-Hill , 1963, 658p.
- LARBURU Nicolas, Técnicas del dibujo 3 elementos de máquina 3^a ed. Paraninfo , 1985, 263p.