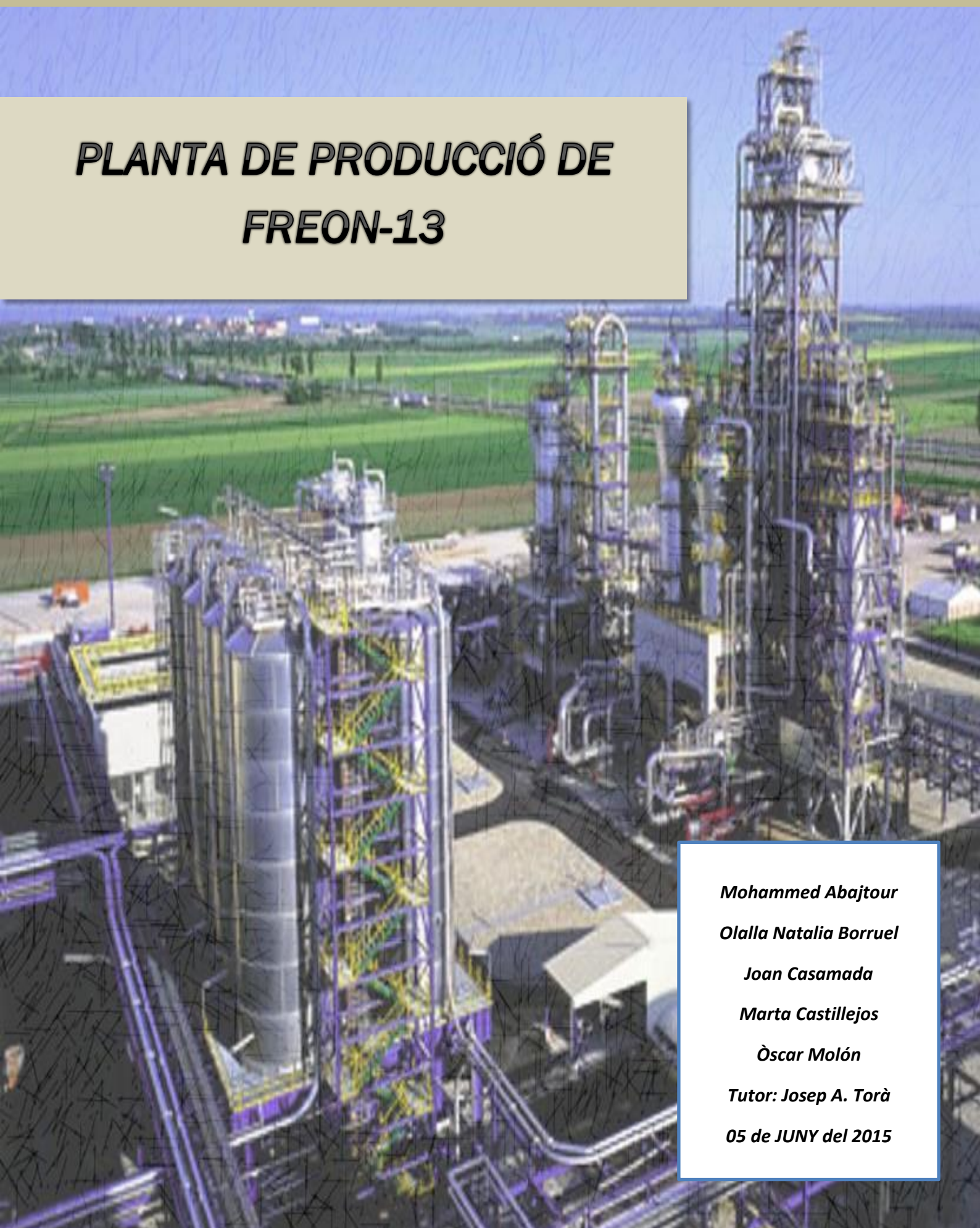


PLANTA DE PRODUCCIÓ DE FREON-13



Mohammed Abajtour

Olalla Natalia Borrue

Joan Casamada

Marta Castillejos

Òscar Molón

Tutor: Josep A. Torà

05 de JUNY del 2015

11. MANUAL DE CÀLCUL

11.1. Tancs d'emmagatzematge	5
11.1.1. Tancs de Tetraclorur de Carboni (CCl ₄).....	5
11.1.2. Tancs de fluorur d'hidrogen (HF)	8
11.1.3. Tancs d'àcid Clorhídric (HCl).....	11
11.1.4. Tanc de FREON-13.....	13
11.1.5. Ampolles de FREON-13	17
11.1.6. Tancs d'aigua descalcificada	18
11.1.7. Disseny parc de tancs	21
11.2. Tancs pulmons.....	22
11.2.1. Tanc pulmó TP-301.....	22
11.2.2. Tanc pulmó TP-501.....	28
11.2.3. Tanc pulmó TP-502.....	29
11.3. Tancs de condensats	31
11.3.1. Tanc de condensat TC-301	31
11.3.2. Tanc de condensat TC-302	31
11.3.3. Tanc de condensat TC-501	32
11.3.4. Tanc de condensat TC-502	32
11.4. Tancs de mescla	34
11.4.1. Tanc de mescla TM-301	36
11.5. Columnes de destil·lació	43
11.5.1. Disseny columna de destil·lació CD-301.....	43
11.5.2. Disseny columna de destil·lació CD-302.....	54
11.5.3. Disseny columna de destil·lació CD-501.....	61
11.5.4. Disseny columna de destil·lació CD-502.....	69
11.6. Columna d'absorció CA-301	76
11.7. Reactor catalític R-201	88
11.7.1. Introducció	88
11.7.2. Balanç de matèria.....	90
11.7.3. Disseny funcional	91
11.7.4. Balanç d'energia	94
11.7.5. Càlcul de l'àrea de bescanvi necessària	96
11.7.6. Dimensionat de la mitja canya	97
11.7.7. Disseny mecànic	100

11.7.8. Disseny de l'agitador	104
11.7.9. Aïllament del reactor.....	108
11.7.10. Disseny del disc de ruptura	108
11.7.11. Catalitzador	110
11.8. Reactor flux pistó R-401	111
11.8.1. Balanç de matèria.....	113
11.8.2. Desactivació del catalitzador.....	114
11.8.3. Determinació del volum del reactor	114
11.8.4. Càlcul del número de tubs.....	115
11.8.5. Balanç d'energia	116
11.8.6. Dimensions geomètriques i comprovació del règim de circulació.....	120
11.8.7. Càlcul de la pèrdua de càrrega al reactor.....	123
11.8.8. Material de construcció del reactor	123
11.8.9. Disseny mecànic	124
11.8.10. Pes del reactor buit	127
11.8.11. Pes del reactor ple.....	127
11.9. Disseny de bescanviadors	128
11.9.1. Mètode Kern	128
11.9.2. Disseny amb Aspen Hysys	136
11.9.3. Bescanviadors del procés.....	140
11.9.4. Condensadors.....	155
11.9.5. Reboilers.....	161
11.9.6. Aïllament dels bescanviadors.....	165
11.10. Disseny de compressors.....	166
11.11. Especificacions i necessitats de serveis de planta.....	169
11.11.1. Chiller d'oli tèrmic	169
11.11.2. Caldera d'oli tèrmic	173
11.11.3. Torre de refrigeració	177
11.11.4. Aire comprimit	183
11.11.5. Nitrogen per a blanketing	184
11.12. Energia elèctrica	185
11.12.1. Introducció	185
11.12.2. Càlcul de la potència total instal·lada	186

11.13. Procediment de càlcul de les canonades de procés	187
11.13.1. Càlcul del diàmetre intern de canonada	187
11.13.2. Càlcul del diàmetre extern de canonada	189
11.14. Procediment de càlcul de les bombes de procés	190
11.14.1. Càlcul de les pèrdues totals.....	190
11.14.2. Càlcul de la potència de la bomba	192
11.15. Decantador (D-901).....	193

11.1. Tancs d'emmagatzematge

11.1.1. Tancs de Tetraclorur de Carboni (CCl₄)

Aquest conjunt de tancs està dissenyant com a tancs verticals amb sostre cònic ja que treballen a temperatura ambient i pressió atmosfèrica.

➤ DIMENSIONAMENT:

Per al càlcul del dimensionament, es considerarà les necessitats de tetraclorur de carboni de la planta per 7 dies per tenir stock suficient en cas de possibles problemes en el transport de la matèria prima.

$$V_{líquid} = (W / \rho_{CCl_4}) \cdot 168h$$

$$V_{líquid} = \left(2189.22 \text{ Kg/h} / 1647 \text{ Kg/m}^3 \right) \cdot 168h = 223.38 \text{ m}^3$$

Degut a l'elevat volum necessari per disposar del requeriments per una setmana d'aquest compost s'escull posar 4 tancs per reduir el volum de cada tanc:

$$V_{tanc} = \frac{223.38 \text{ m}^3}{4 \text{ tancs}} = 55.845 \text{ m}^3$$

Es calcula un factor de sobredimensionament d'un 20%:

$$V_{tanc} = 55.845 \text{ m}^3 \cdot 1,2 = 67.014 \text{ m}^3 \approx \mathbf{70 \text{ m}^3}$$

A partir del volum de cada tanc podem trobar les dimensions d'aquests fixant com a valor el diàmetre d'aquests:

$$D = 3.5 \text{ m}$$

$$H = \frac{V}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{70 \text{ m}^3}{\pi \cdot \left(\frac{3.5 \text{ m}}{2}\right)^2} = 7.3 \text{ m}$$

Per conèixer la alçada real del tanc s'ha d'afegir la part del sostre cònic. Per a tots els tancs amb sostre cònic suposem un pendent del 20º ja que ha d'estar entre 9,5º i 35º.

$$H_{sostre} = r \cdot \tan(\alpha) = 0.57 \text{ m}$$

$$H_{total} = H_{cilindre} + H_{sostre} = 7.87 \text{ m}$$

➤ **DISSENY MECÀNIC:**

El material utilitzat per a la construcció del tanc serà de AISI 304, ja que aquest tanc treballa a baixa pressió i temperatura ambiental i el tetraclorur de carboni no té cap propietat corrosiva que afecti a aquest, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals d'aquest equip i estalviarem costos de producció del equip. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=0,85. S'utilitza el codi ASME per a la determinació del gruix de la paret del tanc d'emmagatzematge. La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1 \quad \text{Equació 11.1.1.1}$$

t és el espessor mínim requerit (m).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (Pa).

R és el radi interior (m).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (Pa)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=0,85).

C₁ es la tolerància a la corrosió (m).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 5.4 \text{ mm}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1 \quad \text{Equació 11.1.1.2}$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (Pa).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (Pa)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=0,85).

L és la longitud del cilindre i els dos fondos (m)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 7.7 \text{ mm}$$

➤ **PES DE L'EQUIP BUIT/ PES DE L'EQUIP PLE:**

Per tal d'especificar el pes de cada tanc d'emmagatzematge, s'han de considerar totes les àrees presents al equip:

$$Pes_{tanc} = \pi \cdot D_C \cdot H \cdot t_{tanc} \cdot \rho_{mat.} + (\pi \cdot R \cdot \sin(\theta) \cdot t_{tanc} \cdot \rho_{mat.})$$

Considerant el gruix de cada superfície i multiplicant per la densitat de l'equip (8000 Kg/m³), s'obté el pes buit del tanc:

$$Pes_{buit} = 7238 \text{ Kg}$$

Per calcular el pes de l'equip ple, s'ha de considerar el pes del líquid que s'aplica dins del tanc:

$$Pes_{ple} = Pes_{buit} + (V_{CCl4} \cdot \rho_{CCl4})$$

$$Pes_{ple} = 99470 \text{ Kg}$$

➤ **VENTEIG**

En aquest cas, per al càlcul de la capacitat de venteig del tanc, requereix l'equació següent:

$$C_{vent.} = \frac{4,414 \cdot Q}{L \cdot \sqrt{M}} \quad \text{Equació 11.1.1.3.}$$

On:

C_{vent} = Capacitat de venteig (m³/h)

M = pes molecular

L = calor latent vaporització

Q = calor rebut (KJ/h) → on Q = 139,7 · F · A^{0,82} · 10³ Equació 11.1.1.4.

F = factor de reducció (F=1)

A = àrea del cilindre (m²)

Els resultats obtinguts són els següents:

$$Q = 5092368.7 \text{ KJ/h}$$

$$C_{vent.} = 1418.18 \text{ m}^3/\text{h}$$

11.1.2. Tancs de fluorur d'hidrogen (HF)

Aquest conjunt de tancs està dissenyant com a tancs verticals amb cap i fons torisfèric.

➤ **DIMENSIONAMENT:**

Per al càlcul del dimensionament, es considerarà les necessitats de fluorur d'hidrogen de la planta per 7 dies, igual que en el cas del tetraclorur de carboni, per tenir stock suficient en cas de possibles problemes en el transport de la matèria prima.

$$V_{líquid} = (W / \rho_{HF}) \cdot 168h$$

$$V_{líquid} = \left(854.42 \text{ Kg/h} / 976.6 \text{ Kg/m}^3 \right) \cdot 168h = 146.95 \text{ m}^3$$

Degut a l'elevat volum necessari per disposar del requeriments per una setmana d'aquest compost s'escull posar 3 tancs per reduir el volum de cada tanc:

$$V_{tanc} = \frac{146.95 \text{ m}^3}{3 \text{ tancs}} = 48.98 \text{ m}^3$$

Es calcula un factor de sobredimensionament d'un 20%:

$$V_{tanc} = 48.98 \text{ m}^3 \cdot 1,2 = 58.78 \text{ m}^3 \approx \mathbf{60 \text{ m}^3}$$

A partir del volum de cada tanc podem trobar les dimensions d'aquests fixant com a valor el diàmetre d'aquests:

$$D = 3.5 \text{ m}$$

$$H = \frac{V}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{60 \text{ m}^3}{\pi \cdot \left(\frac{3.5 \text{ m}}{2}\right)^2} = 6.2 \text{ m}$$

➤ **DISSENY MECÀNIC:**

El material utilitzat per a la construcció del tanc serà de AISI 316, ja que aquest tanc treballa a certa pressió i el fluorur d'hidrogen té propietats corrosives, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals d'aquest equip. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=0,85 igualment. S'utilitza el codi ASME per a la determinació del gruix de la paret del tanc d'emmagatzematge amb l'Equació 11.1.1.1.

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 5.7 \text{ mm}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de l'Equació 11.1.1.2.

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 8.2 \text{ mm}$$

➤ **PES DE L'EQUIP BUIT/ PES DE L'EQUIP PLE:**

Per tal d'especificar el pes de cada tanc d'emmagatzematge, s'han de considerar totes les àrees presents al equip (cilindre + cap i fons torisfèrics):

$$Pes_{tanc} = Pes_{cilindre} + 2 \cdot Pes_{torisfèric}$$

Considerant el gruix de cada superfície i multiplicant per la densitat de l'equip (8000 Kg/m³), s'obté el pes buit del tanc:

$$Pes_{buit} = 7028.5 \text{ Kg}$$

Per calcular el pes de l'equip ple, s'ha de considerar el pes del líquid que s'aplica dins del tanc:

$$Pes_{ple} = Pes_{buit} + (V_{HF} \cdot \rho_{HF})$$

$$Pes_{ple} = 53915 \text{ Kg}$$

➤ **VENTEIG**

Pel càlculs de la capacitat de venteig necessari dels tancs s'utilitzen les equacions 11.1.1.3 i 11.1.1.4.

Els resultats obtinguts són els següents:

$$Q = 4454062.3 \text{ KJ/h}$$

$$C_{vent.} = 5255.2 \text{ m}^3/\text{h}$$

➤ **DISSENY DEL DIMENSIONAT DEL DISC DE RUPTURA**

Com que aquests tancs no treballen a pressió atmosfèrica i hi ha una diferència de pressió amb l'exterior es requereix d'un dispositiu de seguretat en el possible cas d'un augment de pressió. El càlcul de l'àrea necessària del dispositiu de protecció dels tancs per alleugeriment de pressió mitjançant la descàrrega de fluid, es realitzarà en base a la guia de bones pràctiques NTP 457. Segons la NTP 457, i per líquids; la fórmula per calcular l'àrea del disc de ruptura del reactor és la següent:

$$A_o = \frac{0.6211 \cdot q_m}{f_u \cdot \alpha \cdot (\delta p \cdot \rho)^{\frac{1}{2}}}$$

On:

A_o = àrea del disc de ruptura (mm^2)

q_m = cabal màssic a descarregar (kg/h)

α = coeficient de descàrrega (0.62)

f_u = factor de correcció per viscositat (1)

δp = diferència de pressió entre el sistema a pressió i l'exterior

ρ = densitat (Kg/m^3)

Els resultats obtinguts són els següents:

$$A_o = 490 \text{ mm}^2$$

Un cop calculada l'àrea del disc de ruptura, es pot calcular el seu diàmetre amb la següent equació:

$$D = \sqrt{\frac{A_o \cdot 4}{\pi}}$$

Obtenint un valor de:

$$D = 25.3 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona fins al valor més proper de diàmetre nominal normalitzat **DN 32 (1 ¼")**.

11.1.3. Tancs d'àcid Clorhídric (HCl)

Aquest conjunt de tancs està dissenyant com a tancs verticals amb sostre cònic ja que treballen a temperatura ambient i pressió atmosfèrica.

➤ **DIMENSIONAMENT:**

Per al càlcul del dimensionament, es considerarà la producció de clorur d'hidrogen de la planta durant 7 dies, per tenir capacitat suficient en cas de possibles problemes en el transport de d'aquest producte.

$$V_{líquid} = (W / \rho_{HCl}) \cdot 168h$$

$$V_{líquid} = \left(4449.2 \text{ Kg/h} / 1171 \text{ Kg/m}^3 \right) \cdot 168h = 638.31 \text{ m}^3$$

Degut a l'elevat volum necessari per disposar del requeriments per una setmana d'aquest compost s'escull posar 3 tancs per reduir el volum de cada tanc:

$$V_{tanc} = \frac{638.31 \text{ m}^3}{4 \text{ tancs}} = 159.58 \text{ m}^3$$

Es calcula un factor de sobredimensionament d'un 20%:

$$V_{tanc} = 159.58 \text{ m}^3 \cdot 1,2 = 191.5 \text{ m}^3 \approx \mathbf{200 \text{ m}^3}$$

A partir del volum de cada tanc podem trobar les dimensions d'aquests fixant com a valor el diàmetre d'aquests. Com que no volem que tingui una alçada exagerada fixem un diàmetre major als altres:

$$D = 6 \text{ m}$$

$$H = \frac{V}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{200 \text{ m}^3}{\pi \cdot \left(\frac{6 \text{ m}}{2}\right)^2} = 7.1 \text{ m}$$

Per conèixer la alçada real del tanc s'ha d'afegir la part del sostre cònic. Per a tots els tancs amb sostre cònic suposem un pendent del 20º ja que ha d'estar entre 9,5º i 35º.

$$H_{sostre} = r \cdot \tan(\alpha) = 0.97 \text{ m}$$

$$H_{total} = H_{cilindre} + H_{sostre} = 8.07 \text{ m}$$

➤ **DISSENY MECÀNIC:**

El material utilitzat per a la construcció del tanc serà de HDPE ja que l'àcid clorhídric té propietats altament corrosives no suportables per l'AISI 316 com en el cas del fluorhídric, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals d'aquest equip. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1 en aquest cas. S'utilitza el codi ASME per a la determinació del gruix de la paret del tanc d'emmagatzematge amb l'Equació 11.1.1.1.

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 26.3 \text{ mm}$$

L'espessor del sostre en funció de la pressió interna s'obté a partir de l'Equació 11.1.1.2.

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 26.4 \text{ mm}$$

➤ **PES DE L'EQUIP BUIT/ PES DE L'EQUIP PLE:**

Per tal d'especificar el pes de cada tanc d'emmagatzematge, s'han de considerar totes les àrees presents al equip (cilindre + cap i fons torisfèrics):

$$Pes_{tanc} = \pi \cdot D_C \cdot H \cdot t_{tanc} \cdot \rho_{mat.} + (\pi \cdot R \cdot \sin(\theta) \cdot t_{tanc} \cdot \rho_{mat.})$$

Considerant el gruix de cada superfície i multiplicant per la densitat de l'equip (8000 Kg/m³), s'obté el pes buit del tanc:

$$Pes_{buit} = 7028.5 \text{ Kg}$$

Per calcular el pes de l'equip ple, s'ha de considerar el pes del líquid que s'aplica dins del tanc:

$$Pes_{ple} = Pes_{buit} + (V_{HF} \cdot \rho_{HF})$$

$$Pes_{ple} = 53915 \text{ Kg}$$

➤ **VENTEIG**

Pel càlculs de la capacitat de venteig necessari dels tancs s'utilitzen les equacions 11.1.1.3 i 11.1.1.4.

Els resultats obtinguts són els següents:

$$Q = 7744175.26 \text{ KJ/h}$$

$$C_{vent.} = 4177.34 \text{ m}^3/\text{h}$$

11.1.4. Tanc de FREON-13

Aquest tanc està dissenyat com a un tanc horitzontal, degut a les pressions a la que es requereix emmagatzemar, també s'ha d'esmentar que en aquest tanc es calcularà l'espessor que es requereix per a emmagatzemar el producte d'interès a baixes temperatures, a més es calcularà el cabal que es pot evaporar en cas d'un augment de la temperatura, i que requerirà d'un condensador per termes de seguretat.

➤ **DIMENSIONAMENT:**

Per al càlcul del dimensionament, es considerarà que el producte obtingut tindrà un temps de residència de dos dies que serà la durada màxima a la qual es triga a buidar-lo per a la seva venda.

$$V_{líquid} = (W / \rho_{CClF_3}) \cdot 48h = 29,27 \text{ m}^3$$

$$V_{líquid} = \left(1488 \text{ Kg/h} / 1081 \text{ Kg/m}^3 \right) \cdot 48h = 66,07 \text{ m}^3$$

Es calcula un factor de sobredimensionament d'un 20%:

$$V_{tanc} = 66,07 \text{ m}^3 \cdot 1,2 = 79,29 \text{ m}^3 \approx \mathbf{80 \text{ m}^3}$$

Degut al volum del tanc obtingut, es posarà un únic tanc d'emmagatzematge, a més, per termes de seguretat, ja que s'emmagatzema a alta pressió. Per tant la longitud i el diàmetre del tanc és de:

$$D = 4 \text{ m}$$

$$L = \frac{V}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = 6,4 \text{ m}$$

➤ **DISSENY MECÀNIC:**

El material utilitzat per a la construcció del tanc serà de AISI 316, ja que aquest tanc treballa a alta pressió i baixes temperatures, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals d'aquest equip i estalviarem costos de producció del equip. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=0,85. S'utilitza el codi ASME per a la determinació

del gruix de la paret del tanc d'emmagatzematge amb l'Equació 11.1.1.1.
El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 17,3 \text{ mm}$$

L'espessor del sostre en funció de la pressió interna s'obté a partir de l'Equació 11.1.1.2.

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 23,7 \text{ mm}$$

Per al càlcul de l'espessor en funció de la pressió externa es calcula de la mateixa manera que la de la pressió interna, s'obté un espessor de 5,51 mm. El gruix del fons serà el que tindrà un valor major dels calculats per la pressió interna, en aquest cas el valor més gran correspon a la pressió exercida als dos fondos. Per tant el gruix del fons serà de 23,7 mm.

➤ **LONGITUD DEL TANC**

Per calcular la longitud real del tanc s'ha de tenir en compte la longitud del capçal, per això s'utilitzen les següents relacions i equacions per trobar la longitud del capçal.

$$D_i = D_a$$

$$r = 0,1 \cdot D_a$$

$$h_1 \geq 3,5 \cdot t$$

$$h_2 = 0,1935 D_a - 0,455 t$$

$$h_3 = h_1 + h_2$$

Per tant l'altura del capçal és la següent:

$$h_3 = 82,8 \text{ mm} + 763,2 \text{ mm} = 846,0 \text{ mm}$$

Una vegada que es coneix la longitud del tanc, podem saber la longitud real del tanc.

$$L_{tanc} = 6,40 \text{ m} + (2 \cdot 0,846 \text{ m}) = 8,06 \text{ m}$$

➤ **PES DE L'EQUIP BUIT/ PES DE L'EQUIP PLE:**

Per tal d'especificar el pes del tanc d'emmagatzematge, s'han de considerar totes les àrees presents al equip:

$$Pes_{tanc} = \pi \cdot D_C \cdot L \cdot t_{tanc} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{tanc} \cdot \rho_{mat.})$$

Considerant el gruix de cada superfície i multiplicant per la densitat de l'equip (9220 Kg/m³), s'obté el pes buit del tanc:

$$Pes_{buit} = 22457 \text{ Kg}$$

Per calcular el pes de l'equip ple, s'ha de considerar el pes del líquid que s'aplica dins del tanc:

$$Pes_{ple} = Pes_{buit} + (V_{freon-13} \cdot \rho_{freon-13})$$

$$Pes_{ple} = 65311 \text{ Kg}$$

➤ **VENTEIG**

Pel càlcul de la capacitat de venteig necessari dels tancs s'utilitzen les equacions 11.1.1.3 i 11.1.1.4.

Els resultats obtinguts són els següents:

$$Q = 1113136,7 \text{ KJ/h}$$

$$C_{vent.} = 3642,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

➤ **CÀLCUL ESPESSOR D'AÏLLAMENT**

Com ja s'ha esmentat anteriorment, el tanc ha d'estar totalment aïllat de l'exterior, ja que s'ha d'emmagatzemar a temperatures negatives, a -26 °C (247 K). Seguidament es procedirà al càlcul de l'espessor d'aïllament amb poliuretà (34 Kg/m³).

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

On:

m (Kg/s) = cabal de FREON-13 (0,41 Kg/s)

C_p (J/Kg·K) = calor específic (1048 J/Kg·K)

ΔT = diferència entre temperatura a l'interior i temperatura ebullició (3 K)

$$Q = 1299,5 \text{ W}$$

Seguidament, podrem calcular el gruix d'aïllant per la diferència de temperatura de l'interior a l'exterior, juntament amb les resistències de cada material, seguidament mostrarem un esquema de la conducció radial en el tanc. La temperatura a l'interior se li resta 10 graus a la temperatura d'emmagatzematge per al càlcul amb la temperatura de disseny (per termes de seguretat).

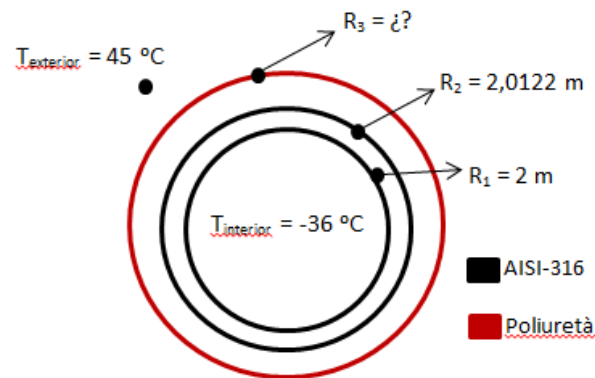


Figura 11.1.4.1: Esquema de conducció de calor del tanc cilíndric.

Per al càlcul del radi del aïllant, s'utilitza la següent equació:

$$Q = 1299,5 = \frac{T_{ext} - T_{int}}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{K_{AISI} \cdot 2\pi L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{K_{poliuret\grave{a}} \cdot 2\pi L}}$$

On:

K_{AISI} = conductivitat tèrmica AISI-316 (17 W/m·K)

$K_{poliuret\grave{a}}$ = conductivitat tèrmica poliuretà (0,026 W/m·K)

L = longitud del tanc (6,4 m)

Aïllem de l'equació anterior r_3 i obtenim que el gruix de la capa d'aïllant (poliuretà) és de:

$$r_3 = 2,1291 \text{ m}$$

$$r_3 - r_2 = \Delta x = 0,1169 \text{ m} = 117 \text{ mm} \approx \mathbf{120 \text{ mm}}$$

➤ **CÀLCUL CABAL FRACCIÓ VAPORITZADA**

Per termes de seguretat, cal calcular el cabal que es podria evaporar en el cas que hi hagués un augment de la temperatura, per això, el cabal que s'obtingués caldria condensar-lo per reciclar-lo de nou al tanc. Per al càlcul del cabal evaporat es calcula a partir de la següent equació:

$$M_v = M_o \cdot [1 - \exp(-C_p \cdot (T_{eb} - T_o)/h_v)]$$

On:

M_v = quantitat evaporada (Kg)

M_o = quantitat emmagatzemada (Kg)

C_p = capacitat calorífica FREON-13 (J/Kg·K)

h_v = calor de vaporització FREON-13 (J/Kg)

$$M_v = 71424 \cdot [1 - \exp(-1048 \cdot (-23,7 + 26)/389000)]$$

$$M_v = 441,2 \text{ Kg}$$

$$\% \text{ evaporat} = \frac{441,2 \text{ Kg}}{71424 \text{ Kg}} \cdot 100 = 0,62 \%$$

Per tant, per a un cabal inicial de 1488 Kg/h i sabent el tant per cent evaporat, obtenim que s'evaporaria **9,2 Kg/h**. Per a condensar aquest cabal, es requereix d'un condensador on circularà un cabal de 78 Kg/h de DOWTHERM-J. Com que aquest condensador treballarà en moments espontanis, i tindria unes dimensions molt petites, no es dissenyarà encara que s'ha de tenir en compte per al control del tanc i per a termes de seguretat.

11.1.5. Ampolles de FREON-13

El FREON-13 produït a la planta es comercialitzarà a posteriori en ampolles de 50 litres com a gas comprimit. Aquestes ampolles aniran correctament etiquetades segons la normativa corresponent explicada a l'apartat de Seguretat.

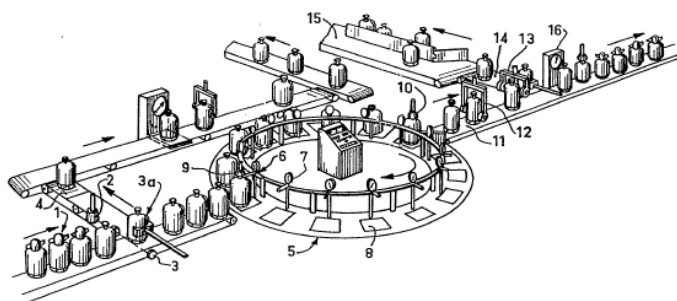
El procés de embotellament es duu a terme dins d'un edifici de l'àrea 100. Aquest procés consta de 3 parts: pesada prèvia a la carga, carga de l'ampolla i pesada posterior a la carga. Amb aquestes 3 parts s'assegura que totes les ampolles contenen el mateix volum de FREON-13.

L'equip de embotellament consta d'una cinta transportadora que guia les ampolles fins a la bàscula prèvia a la carga on registra el pes de cada vàlvula posteriorment comparat amb la segona vàlvula. Just després de la bàscula les ampolles passen per una cinta giratòria que permet la carga continua de varies ampolles simultàniament. La carga es fa a través d'una connexió des de una canonada provinent directament del tanc d'emmagatzematge de FREON-13 (T-112) fins a la ampolla amb una junta per pressió. A la cinta giratòria hi ha un capçal de

connexió per cada ampolla on hi ha una vàlvula reguladora al final de cada connexió que s'obre i es tanca el temps estipulat per omplir 1 ampolla. A continuació després de la cinta giratòria les ampolles segueixen per una cinta on arriben a la 2 bàscula i comparant el pes amb la primera es separen les ampolles que tinguin el pes correcte de les que hagin sofert alguna variació amb el contingut perquè un operari les revisi.

Finalment un operari recopila les ampolles finals en palets emmagatzemant-los al lloc adequat per aquestes.

L'esquema d'aquesta seqüència es mostra a la figura següent:



11.1.6. Tancs d'aigua descalcificada

En la planta de producció del CClF_3 es requereix d'un subministrament continu d'aigua descalcificada per a diferents zones del procés, com són en la zona de tractament del clorur d'hidrogen, és a dir, en la torre d'absorció (CA-301); i també per al requeriment d'aigua en la torre de refrigeració en la zona de serveis de planta. S'ha d'esmentar que el corrent d'aigua que s'envia a la CA-301 s'enviarà a una desionitzadora, ja que per tal d'utilitzar l'aigua com a sistema de producció es requereix anteriorment haver de desionitzar-la.

➤ **DIMENSIONAMENT:**

Per tal de fer el dimensionament, prèviament s'haurà de calcular el cabal total d'aigua que s'ha d'utilitzar tant en la torre de refrigeració com en la columna d'absorció del HCl.

Taula 11.1.6.1. Cabals requerits d'aigua a la planta

W CA-301 (Kg/h)	2900,0
W torre ref. (Kg/h)	1964,5

El cabal obtingut és important, però els tancs s'han dissenyat amb temps de residència menors, ja que la producció d'aigua descalcificada és contínua i els tancs s'aniran omplint contínuament. Per tant, es considerarà que la fàbrica tindrà un volum d'aigua suficient per cobrir 6 hores. A partir d'aquí podem obtenir el volum de líquid total:

$$V_{líquid} = (W/\rho_{H_2O}) \cdot 6h = 29,27 \text{ m}^3$$

I, sobre dimensionant el tanc un 30%, per a possibles variacions o altres necessitats de la planta:

$$V_{tanc} = 1,3 \cdot 29,27 = 38,0 \text{ m}^3$$

Després de calcular el volum del tanc, es decideix implementar dos tancs d'aigua, i prenent una geometria de cos cilíndrica (en aquest cas, al suposar un capçal cònic de 3,6°, s'han simplificat els càlculs del dimensionament tot suposant únicament el cos cilíndric) s'obté que:

$$V_{tanc} = 38,0/2 = 19,0 \text{ m}^3$$

$$D = 2,72 \text{ m}$$

$$H = 3,27 \text{ m}$$

➤ **DISSENY MECÀNIC:**

Per tal d'emmagatzemar el tanc d'aigua, es considera a temperatura ambient i a pressió atmosfèrica. De manera que el seu disseny es basa en API 650.

$$D_{int.} = 272,3 \text{ cm}$$

$$h_{lq.} = 176,7 \text{ cm}$$

$$Corrosió \text{ empresa} = 0,16 \text{ cm}$$

$$Material = A - 283 - C$$

$$Esforç \text{ disseny} = 1410 \text{ Kg/cm}^2$$

$$Esforç \text{ força hidrost.} = 1580 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\rho_{rel.} = 1$$

Càlcul de l'espessor del cos:

Seguint el codi ASME, el gruix obtingut per al cos del tanc d'aigua ha sigut de 2,6 mm; una vegada hem obtingut aquest gruix, a partir del mètode del peu calculem el gruix per al primer anell a les condicions de disseny i per a prova hidrostàtica:

$$t_d = \frac{0,0005 \cdot 272,3 \cdot (176,7 - 30,48) \cdot 1}{1410} + 0,16 = 1,74 \text{ mm}$$

$$t_d = \frac{0,0005 \cdot 272,3 \cdot (176,7 - 30,48) \cdot 1}{1580} + 0,16 = 1,73 \text{ mm}$$

Com que els valors calculats per al primer anell resulten inferiors a l'espessor mínim del cos, es negligeix el càlcul per a la resta d'anells, doncs els valors resultarien ser encara més inferiors. Per tant l'espessor mínim calcular ha sigut de 2,6 mm, que serà el mateix gruix que el cap cònic segons API 650.

Càlcul de l'espessor del fons:

A partir de l'equació del càlcul del gruix segons el codi API:

$$t_d = 3,2 \text{ mm}$$

➤ **PES DE L'EQUIP BUIT/ PES DE L'EQUIP PLE:**

Per tal d'especificar el pes del tanc d'emmagatzematge, s'han de considerar totes les àrees presents al equip:

$$A_{lat.cilindre} = 2\pi r h$$

$$A_{lat.con} = \pi r g$$

$$A_{cercle} = \pi r^2$$

Considerant el gruix de cada superfície i multiplicant per la densitat de l'equip (7850 Kg/m³), s'obté el pes buit del tanc:

$$Pes_{buit} = 1578 \text{ Kg}$$

Per calcular el pes de l'equip ple, s'ha de considerar el pes del líquid que s'aplica dins del tanc:

$$Pes_{ple} = Pes_{buit} + (V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O})$$

$$Pes_{ple} = 30765 \text{ Kg}$$

11.1.7. Disseny parc de tancs

Els tancs d'emmagatzematge per a líquids s'han de trobar a l'interior d'una cubeta de retenció. Aquesta cubeta de retenció evita problemes deguts a alguna possible fuga als tancs.

Cada grup de tancs amb les mateixes propietats tindrà una cubeta diferent per evitar possibles contactes entre reactius.

A les cubetes els recipients han d'estar col·locats com a molt en dues fileres i mantenint una distància de seguretat entre els tancs i la paret d'aquesta de 1 metre com a mínim. En el cas de líquids corrosius la llei imposa una distància de 1 metre i mig, per això i per simplificar el sistema es fan totes les cubetes amb una distància entre tanc i paret de 1,5 metres. A més a més entre cada tanc hi ha d'haver una distància corresponent al radi dels tancs.

Per dissenyar les cubetes s'ha de calcular el volum d'aquestes. Aquest volum es calcula com el valor major entre el volum total del tanc més gran o el 10% de la suma dels volums de tots els tancs continguts per la cubeta.

Coneixen la distància que ha de tenir entre tanc-tanc i entre paret-tanc es coneix l'amplada i la llargada que ha de tenir la cubeta podem calcular l'àrea de la base. D'aquest valor se li resta l'àrea que ocupen els tancs i es calcula l'alçada a partir del volum que ha de tenir. Aquest valor es sobredimensiona un 20% per motius de seguretat.

S'obtenent les següents dimensions per a cada conjunt de tancs:

Taula 11.1.7.1: Dimensions de les cubetes de cada reactiu i producte líquids.

	Fluorur d'hidrogen	Tetraclorur de carboni	Àcid clorhídric
Amplada (m)	6,50	6,50	9,00
Llargada (m)	17,00	22,25	36,00
Àrea total (m ²)	110,50	144,63	324,00
Àrea útil (m ²)	81,63	106,14	323,21
Hcubeta (m)	0,74	0,66	0,62
Hcubeta sobredim. (m)	0,88	0,79	0,74

11.2. Tancs pulmons

En la planta de producció del FREON-13, és necessària la implementació de tancs pulmons al llarg del procés, sobretot per aquelles àrees on podem trobar recirculacions, ja que és imprescindible mantenir un cabal constant a les entrades dels diferents equips que les incorporen. També els tancs pulmons ens permet millorar el control dels diferents paràmetres a mesurar, sobretot el de temperatura i cabal.

Sobretot s'ha d'esmentar que el principal motiu de les instal·lacions d'aquests tancs són les posades en marxa, ja que aquests tancs ens permeten reciclar les sortides dels diferents equips per tal de ser reconduïts fins a que es treballi en estat estacionari. Una vegada s'ha arribat a aquest estat, es tanca la corrent de reciclat al tanc pulmó i segueix per la corrent de procés.

11.2.1. Tanc pulmó TP-301

11.2.1.1. Càlcul del volum del TP-301

Ara es mostrarà el procediment de càlcul per al disseny del tanc pulmó TP-301, s'ha d'esmentar que aquest tanc a sigut dissenyat amb un temps d'autonomia de 2 hores (per tal d'actuar en cas de parada d'emergència) i per poder suportar a més a més, la càrrega equivalent a la variació d'un metre l'alçada del líquid en el reactor, tenint així un control de nivell.

Primerament s'exposarà els cabals volumètrics d'entrada al tanc pulmó TP-301 que ens facilitaran el càlcul del seu volum:

Taula 11.2.1.1: Cabals volumètrics d'entrada al TP-301

	Cabal volumètric (m³/h)
Corrent de procés	3,65
Corrent destil·lat	2,85
Suma	6,50

Com es pot veure, per al seu disseny s'ha tingut en compte el corrent del destil·lat de la columna de destil·lació CD-302, ja que en la posada en marxa d'aquesta columna, és necessària la recirculació del destil·lat al tanc pulmó per treballar en estat estacionari. Per tant, sabent el cabal volumètric d'entrada totals i el temps de residència, podem saber el volum del TP-301:

$$V_1 = \tau \cdot Q_L = 13,00 \text{ m}^3$$

On:

$\tau = 2$ hores

$Q_L = 6,50 \text{ m}^3/\text{h}$

Sabent les dimensions de la columna de destil·lació CD-302, s'ha calculat el volum equivalent a la variació d'un metre en la altura de la columna, aquest volum es calcula amb la següent equació:

$$V_2 = \pi \cdot \left(\frac{D_c}{2}\right)^2 \cdot h$$

On:

D_c = diàmetre de la columna (0,46 m)

h = alçada a controlar (1 m)

S'ha obtingut un $V_2 = 0,17 \text{ m}^3$; per tant el volum del tanc pulmó serà la suma entre V_1 i V_2 i es multiplica per un 15%, per tal de tenir en compte el sobredimensionat de l'equip per temes de seguretat (ja que no és segur tenir el tanc pulmó 100% omplert). El volum total obtingut ha sigut de **15,13 m³**. Fixant una relació $h/d = 1,5\text{m}$, podem trobar el diàmetre del tanc pulmó:

$$D_p = \left(\frac{V \cdot 4}{\pi \cdot 1,5}\right)^{1/3}$$

On:

D_p = diàmetre del tanc pulmó (m)

V = volum total del tanc pulmó (15,1 m³)

El diàmetre del tanc pulmó ha sigut de 2,34 metres, per tant l'altura d'aquest equip ha sigut de 3,51 metres.

11.2.1.2. Dimensionament mecànic

El material utilitzat per a la construcció del tanc pulmó TP-301 serà de Hastelloy B-2, ja que aquest tanc treballa amb components corrosius molt forts com són el HCl i el HF, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals d'aquest equip i estalviarem costos de producció del equip. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1.

S'utilitza el codi ASME per a la determinació del gruix de la paret de la columna. La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{0.385 \cdot S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1$$

Per al càlcul de la pressió de disseny i la temperatura de disseny s'utilitzen les següents equacions:

$$T^a_{disseny} = 0,5 T^a_{op.} + 20 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

$$P_{disseny} = P_{op.} + 25 \text{ (psi)}$$

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (142,6 psi).

R és el radi interior (46,1 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (110000 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

C₁ es la tolerància a la corrosió (0,078 inch).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,233 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 5,93 \text{ mm} \approx \mathbf{6 \text{ mm}}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (142,6 psi).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (110000 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

L és la longitud del cilindre i els dos fondos (138,30 inch)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,207 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 5,26 \text{ mm} \approx \mathbf{6 \text{ mm}}$$

El gruix del fons serà el que tindrà un valor major dels calculats per la pressió interna, en aquest cas el valor més gran correspon a la pressió exercida a les parets. Per tant el gruix del fons serà de 6 mm.

➤ Pes del tanc pulmó

Per tal de calcular el pes total del tanc, primerament calcularem el seu pes quan l'equip es troba totalment buit. Aquest pes es calcula a partir de la següent equació:

$$Pes_{tp.buit} = \pi \cdot D_P \cdot H \cdot t_{tp} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{tp} \cdot \rho_{mat.})$$

On:

D_P = Diàmetre tanc pulmó (m)

H = Alçada tanc pulmó (m)

t_{tp} = gruix del fons (6×10^{-3} m)

ρ_{mat} = densitat Hastelloy B-2 (9220 Kg/m³)

$$Pes_{tp.buit} = 1505 \text{ Kg}$$

Seguidament calcularem el pes del líquid que serà circulat a través del tanc pulmó, d'aquesta manera sabrem el pes total d'aquest equip:

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{tp}}{2} \cdot \rho_L$$

On:

V_{tp} = Volum tanc pulmó (m³)

ρ_L = Densitat del líquid (1300 Kg/m³)

$$Pes_{líquid} = 9836 \text{ Kg}$$

$$Pes_{total} = Pes_{tp.buit} + Pes_{líquid} = \mathbf{11341 \text{ Kg}}$$

➤ Càlcul de l'espessor d'aïllament

El tanc pulmó s'ha de mantenir a una temperatura constant, que a de ser de -26 °C, temperatura molt baixa degut a que els compostos que hi circulen necessiten aquestes

condicions per a trobar-los en estat líquid. Seguidament mostrarem una taula dels diferents aïllants més utilitzats en plantes químiques:

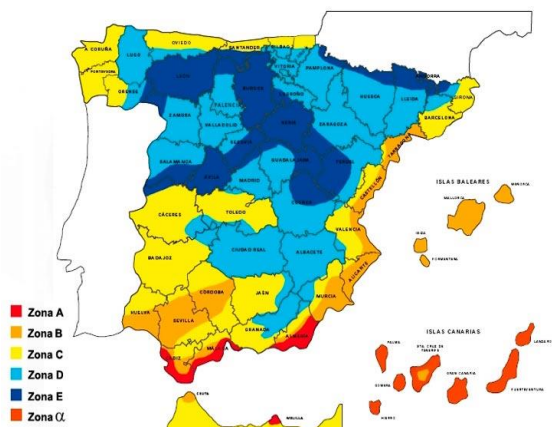
Taula 11.2.1.2.1: Diferents aïllants tèrmics més utilitzats en les plantes químiques.

Minerales	Plàstics
LANA DE VIDRIO Con encolado, 250 °C Sin encolado, 500 °C LANA DE ROCA Hasta 750 °C FIBRA CERAMICA Hasta 1.500 °C	POLIESTIRENO Expandido, 70 °C Extrusionado, 85 °C POLIURETANO 100 °C

Degut a que treballem a -26 °C i la màxima diferència de temperatura respecte a l'exterior no serà més de 70 °C (diferència entre -26 °C i 40 °C que podríem arribar a l'estiu en condicions extremes), s'ha decidit utilitzar poliestirè expandit. Ara mostrarem una taula per tal de decidir quin gruix establir per a aquest aïllant:

Taula 11.2.1.2.2: Gruixos segons el tipus de coberta i segons la zona territorial

APLICACIONES MÁS HABITUALES	Espesor mínimo en cm. para no superar el valor U límite del CTE HE-I.				
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D	Zona E
CUBIERTA PLANA	6	7	7-8	8	8-9
CUBIERTA INCLINADA	6-7	7	7-8	8	9
FACHADA (aislamiento en cámara y por el interior)	4	5	5-6	6	8
FACHADA (aislamiento por el exterior)	4	4	4	5	6
SUELO (sobre espacio no calefactado)	5	5-6	5-6	5-6	5-6
SUELO (sobre exterior)	5-6	5-6	6	6	6



Gràcies a la taula anterior, sabent que ens trobem en la Zona C i que el nostre equip es pot considerar de coberta plana-inclinada, hem decidit utilitzar poliestirè expandit amb un gruix de 8 cm i una eficiència d'aïllament del 93% aproximadament.

11.2.1.3. Venteig

En aquest cas, per al càlcul de la capacitat de venteig del tanc pulmó, requereix l'equació següent:

$$C_{vent.} = \frac{4,414 \cdot Q}{L \cdot \sqrt{M}}$$

On:

C_{vent} = Capacitat de venteig (m^3/h)

M = pes molecular

L = longitud del tanc

Q = calor rebut (KJ/h) $\rightarrow$ on $Q = 139,7 \cdot F \cdot A^{0,82} \cdot 10^3$

F = factor de reducció (F=1)

A = àrea del cilindre (m^2)

Els resultats obtinguts són els següents:

$$Q = 2537792,7 \text{ KJ/h}$$

$$C_{vent.} = 25556 \text{ m}^3/h$$

11.2.1.4. Càlcul de la cubeta de retenció

La cubeta de retenció en aquest cas només conté el tanc pulmó, de manera que:

$$V = 15 \text{ m}^3$$

Prenent una distància de separació entre la paret del recipient i la paret de la cubeta de 1.5 metres, les dimensions de la cubeta es calculen com:

$$L_{cubeta} = D_{tanc} + (2 \cdot 1,5) = 5,3 \text{ m}$$

$$W_{cubeta} = D_{tanc} + (2 \cdot 1,5) = 5,3 \text{ m}$$

Per tant, l'àrea total de la cubeta:

$$A_{cubeta} = 28,1 \text{ m}^2$$

Per a conèixer però l'àrea útil de la cubeta, cal contemplar l'àrea ocupada pel tanc. D'aquesta manera:

$$A_{\text{útil cubeta}} = 28,1 - \left(\pi \frac{D_{tanc}^2}{4} \right) = 23,8 \text{ m}^2$$

Finalment, per a calcular l'altura de la cubeta:

$$h_{cubeta} = \frac{28,1}{23,8} = 1,2 \text{ metres}$$

11.2.1.5. Resultats finals

Seguidament mostrarem una taula que resumeix les característiques més importants del tanc pulmó TP-301:

Taula 11.2.1.5.1: Resum dels paràmetres a destacar de TP-301.

Nom de l'equip	TP-301
Temperatura d'operació (°C)	-26
Pressió de disseny (KPa)	837,9
Volum del dipòsit (m ³)	15,13
Diàmetre (m)	2,34
Alçada cilindre (m)	3,51
Alçada toriesfèric (m)	0,47
Gruix equip(mm)	6
Pes de l'equip buit (Kg)	1505
Pes de l'equip ple (Kg)	11341
Material de l'equip	Hastelloy B-2
Material aïllament	Poliestirè extursionat
LxL cubeta (m)	5,3x5,3
Altura cubeta (m)	1,2

11.2.2. Tanc pulmó TP-501

A continuació mostrarem una taula amb les característiques més importants i a destacar del TP-501, el mètode de càlcul per al seu disseny a sigut igual que en l'apartat 11.2.1, i com ja s'ha especificat, el temps d'autonomia correspon a un total de 2 hores. En aquest cas el material de disseny a sigut el AISI 304L, ja que no tenim compostos corrosius i per tant abaratim els costos de disseny, ja que el Hastelloy B-2 és molt més car.

Taula 11.2.2.1: Resum dels paràmetres a destacar de TP-501.

Nom de l'equip	TP-501
Temperatura d'operació (°C)	-15
Pressió de disseny (KPa)	783,5
Volum del dipòsit (m ³)	8,35
Diàmetre (m)	1,92
Alçada cilindre (m)	2,88
Alçada toriesfèric (m)	0,43
Gruix equip(mm)	19
Pes de l'equip buit (Kg)	2890
Pes de l'equip ple (Kg)	9037
Material de l'equip	AISI 304L

Material aïllament	Poliestirè expandit
LxL cubeta (m)	4,9x4,9
Altura cubeta (m)	1,1

11.2.3. Tanc pulmó TP-502

A continuació mostrarem una taula amb les característiques més importants i a destacar del TP-502, el mètode de càlcul per al seu disseny a sigut igual que en l'apartat 11.2.1, i com ja s'ha especificat, el temps d'autonomia correspon a un total de 2 hores. En aquest cas el material de disseny a sigut el AISI 304L, ja que no tenim compostos corrosius i per tant abaratim els costos de disseny, ja que el Hastelloy B-2 és molt més car.

Taula 11.2.3.1: Resum dels paràmetres a destacar de TP-502.

Nom de l'equip	TP-502
Temperatura d'operació (°C)	100
Pressió de disseny (KPa)	678,9
Volum del dipòsit (m ³)	2,61
Diàmetre (m)	1,30
Alçada cilindre (m)	1,96
Alçada torisfèric (m)	0,29
Gruix equip (mm)	11
Pes de l'equip buit (Kg)	840
Pes de l'equip ple (Kg)	2693
Material de l'equip	AISI 304L
Material aïllament	Llana mineral de roca
LxL cubeta (m)	4,3x4,3
Altura cubeta (m)	1,1

En aquest cas utilitzem llana mineral de roca, on obtenim el seu gruix d'aïllament a partir d'un programa de càlcul de l'espessor d'aïllament, anomenat CALORCOL, de la empresa Calorcol S.A. Els resultats obtinguts són els següents:



CALORCOL S.A.

INFORME TÉCNICO - TRANSFERENCIA DE CALOR PARA SUPERFICIES PLANAS (CALOR)

PRODUCTO: MANTAS AISLANTES DE 80 kg/m³ FECHA: 30/12/1899

DATOS DE ENTRADA

Producto	Mantas Aislantes de 80 kg/m ³
Temperatura Interior	°C 80.0
Temperatura Superficie Aislam. supuesta	°C 35.0
Temperatura Ambiente	°C 16.0
Velocidad del Aire	mi/h 8.39
Material Superficie Aislamiento	ACERO INOXIDABLE EN SERVICIO (USADO)
Emisividad Superficie Aislamiento	0.3
Material Superficie Desnuda	ACERO INOXIDABLE
Emisividad Superficie Desnuda	0.3

SUPERFICIE PLANA HORIZONTAL CARA HACIA ARRIBA

		EXACTO	RECOMENDADO
Temperatura de la Superficie	°C	24.51	27.61
Temperatura Media	°C	126.06	128.85
Coefficiente de Conductividad Térmica	BTU plg/pie ² h °F	0.28	0.28
Conductancia de la película de aire	BTU/pie ² h °F	2.45	2.5
ESPESOR DEL AISLAMIENTO	plg	0.73	0.5
Pérdida de Calor por Radiación	BTU/pie ² h	4.71	6.53
Pérdida de Calor por Convección	BTU/pie ² h	32.78	48.55
Pérdida de Calor Total	BTU/pie ² h	37.49	55.08
Pérdida de Calor Superficie Desnuda	BTU/pie ² h	461.74	461.74
Eficiencia del Aislamiento	%	91.88	88.07

11.3. Tancs de condensats

Per tal de poder dissenyar el tancs de condensats provinents de les columnes de destil·lació, hem seguit el mateix procediment de càlcul que en els tancs pulmons, igual que en l'apartat 11.2.1. Únicament hi ha una diferència, en aquest cas s'ha definit un temps de residència de 15 minuts segons expressa una font bibliogràfica (*Solucions pràctiques per Enginyers Químics*, Carl R. Branan), suficient per tal de dur a terme la seva funció.

D'aquesta manera, hem pogut fer el disseny dels diferents tancs de condensats, on seguidament exposarem les característiques més rellevants de cada equip de condensat.

11.3.1. Tanc de condensat TC-301

Taula 11.3.1.1: Resum dels paràmetres a destacar de TC-301.

Nom de l'equip	TC-301
Temperatura d'operació (°C)	-28
Pressió de disseny (KPa)	843,9
Volum del dipòsit (m ³)	1,9
Diàmetre (m)	1,17
Alçada cilindre (m)	1,76
Alçada toriesfèric (m)	0,24
Gruix equip(mm)	4
Pes de l'equip buit (Kg)	316
Pes de l'equip ple (Kg)	1550
Material de l'equip	Hastelloy B-2
Material aïllament	Poliestirè expandit

11.3.2. Tanc de condensat TC-302

Taula 11.3.2.1: Resum dels paràmetres a destacar de TC-302.

Nom de l'equip	TC-302
Temperatura d'operació (°C)	-38
Pressió de disseny (KPa)	884,6
Volum del dipòsit (m ³)	1,01
Diàmetre (m)	0,95
Alçada cilindre (m)	1,42
Alçada toriesfèric (m)	0,20
Gruix equip(mm)	4
Pes de l'equip buit (Kg)	212
Pes de l'equip ple (Kg)	868

Material de l'equip	Hastelloy B-2
Material aïllament	Poliestirè extursionat

11.3.3. Tanc de condensat TC-501

Taula 11.3.3.1: Resum dels paràmetres a destacar de TC-501.

Nom de l'equip	TC-501
Temperatura d'operació (°C)	-35
Pressió de disseny (KPa)	783,3
Volum del dipòsit (m ³)	0,84
Diàmetre (m)	0,89
Alçada cilindre (m)	1,34
Alçada toriesfèric (m)	0,20
Gruix equip(mm)	10
Pes de l'equip buit (Kg)	430
Pes de l'equip ple (Kg)	1048
Material de l'equip	AISI 304L
Material aïllament	Poliestirè extrusionat

11.3.4. Tanc de condensat TC-502

Taula 11.3.4.1: Resum dels paràmetres a destacar de TC-502.

Nom de l'equip	TC-502
Temperatura d'operació (°C)	57
Pressió de disseny (KPa)	678,9
Volum del dipòsit (m ³)	0,27
Diàmetre (m)	0,61
Alçada cilindre (m)	0,91
Alçada toriesfèric (m)	0,12
Gruix equip(mm)	6
Pes de l'equip buit (Kg)	134
Pes de l'equip ple (Kg)	259
Material de l'equip	AISI 304L
Material aïllament	Llana mineral de roca

En aquest cas utilitzem llana mineral de roca, on obtenim el seu gruix d'aïllament a partir d'un programa de càlcul de l'espessor d'aïllament, anomenat CALORCOL, de la empresa Calorcol S.A. Els resultats obtinguts són els següents:



CALORCOL S.A.

INFORME TÉCNICO - TRANSFERENCIA DE CALOR PARA SUPERFICIES PLANAS (CALOR)

PRODUCTO: MANTAS AISLANTES DE 80 kg/m³ FECHA: 25/04/2015

Empresa que realiza el estudio: Calorcol S.A.

DATOS DE ENTRADA

Producto	Mantas Aislantes de 80 kg/m ³
Temperatura Interior	°C 57.0
Temperatura Superficie Aislam. supuesta	°C 35.0
Temperatura Ambiente	°C 16.0
Velocidad del Aire	mi/h 8.39
Material Superficie Aislamiento	ACERO INOXIDABLE EN SERVICIO (USADO)
Emisividad Superficie Aislamiento	0.3
Material Superficie Desnuda	ACERO INOXIDABLE
Emisividad Superficie Desnuda	0.3

SUPERFICIE PLANA HORIZONTAL CARA HACIA ARRIBA

		EXACTO	RECOMENDADO
Temperatura de la Superficie	°C	24.51	23.3
Temperatura Media	°C	105.36	104.27
Coeficiente de Conductividad Térmica	BTU plg/pie ² h °F	0.27	0.26
Conductancia de la película de aire	BTU/pie ² h °F	2.45	2.44
ESPESOR DEL AISLAMIENTO	plg	0.41	0.5
Pérdida de Calor por Radiación	BTU/pie ² h	4.71	4.01
Pérdida de Calor por Convección	BTU/pie ² h	32.78	27.0
Pérdida de Calor Total	BTU/pie ² h	37.49	31.02
Pérdida de Calor Superficie Desnuda	BTU/pie ² h	264.41	264.41
Eficiencia del Aislamiento	%	85.82	88.27

11.4. Tancs de mescla

Aquests tipus de tancs s'utilitzen en la majoria de les plantes químiques que trobem arreu del món, consisteix en un dipòsit on els components d'entrada es combinen i es mesclen sense haver-hi reacció química. Els tipus de mescles que trobem poden ser homogènies o bé heterogènies.

El procés d'agitació és molt important per als dipòsits de mescla, ja que a partir de la potència d'agitació obtenim major o menor eficiència de mescla de les diferents substàncies. Encara que, degut a la complexitat del fenòmens de transport involucrats, es un dels processos més difícils d'analitzar i caracteritzar. Així, fins al moment, no existeixen correlacions generals per configuracions arbitràries d'agitació que descriguin quantitats útils com la velocitat de mescla o el grau d'homogeneïtat a la qual arriba el sistema.

Generalment, el tanc d'agitació es un recipient circular, que pot estar tancat o obert per la seva part superior. Per evitar zones amb baixes velocitats, en els racons s'eliminen utilitzant un fons circular.

Per tant s'ha de comentar que l'agitació ens permet incrementar la transferència de calor en el fluid o bé incrementar la transferència de matèria, és a dir, de mescla. El patró de flux que hi ha dintre d'un mesclador amb deflectors és el següent:

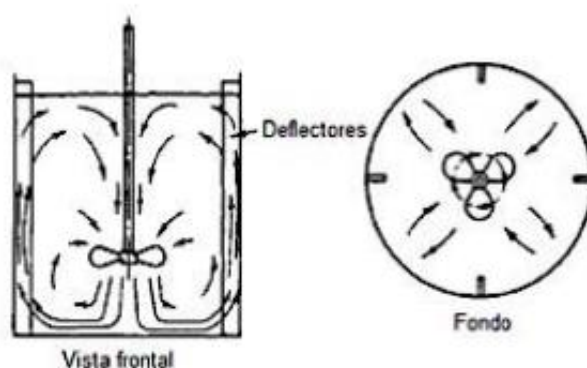


Figura 11.4.1: Flux axial en un recipient amb deflectors.

També s'ha de mostrar els components més importants que componen un tanc de mescla isoterm:

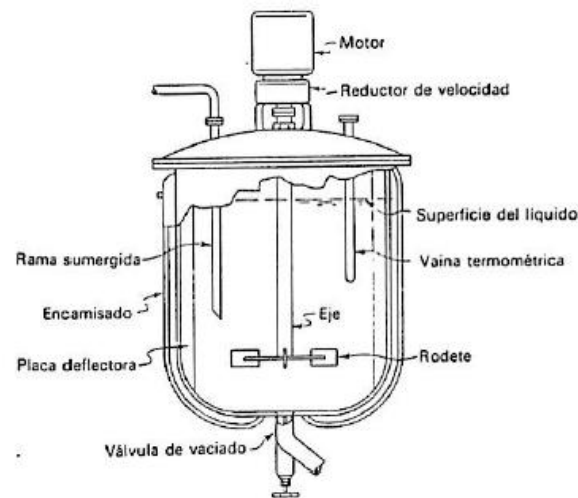


Figura 11.4.2: Exemple d'un tanc de mescla.

El rodete o l'hèlix sol estar acoblat a un eix aproximadament vertical. L'excentricitat i inclinació d'aquest eix es poden variar per arribar a rendiments majors.

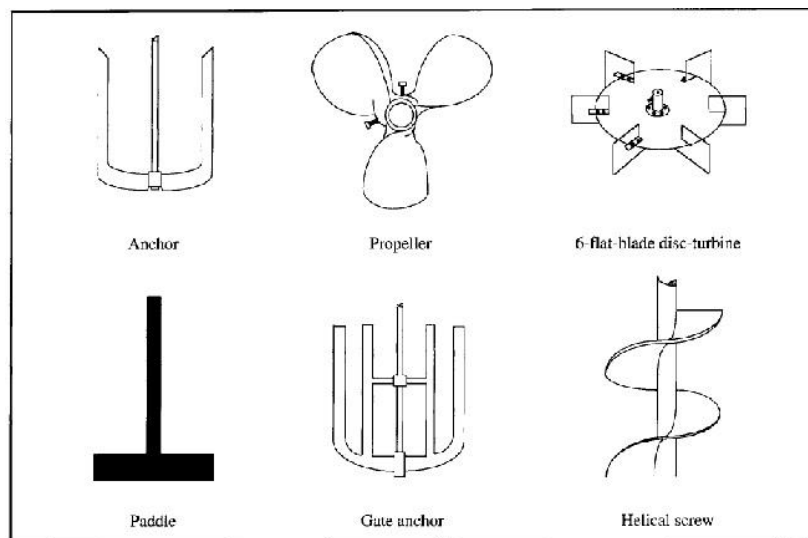


Figura 11.4.3: Exemple de diferents rodets i hèlixs.

En el procés de mescla pot involucrar la mescla de gasos, líquids o sòlids, en alguna possible combinació de dos o més constituents. La mescla de líquids amb líquids o gasos amb líquids, es un problema comú i ha sigut estudiat extensivament. La mescla de líquids amb sòlids pot ser tractada de la mateixa manera que la mescla de líquids amb líquids, quan la proporció de líquid a sòlid es gran. Si la proporció de líquid a sòlid es petita, el procés es torna similar al de la mescla de sòlids amb sòlids. Els aparells utilitzats per l'agitació són: impulsors rotatoris,

sistemes de circulació per bombeig, paletes recíprocs, tancs rotatoris, agitadors d'aire i molins col·loïdals.

11.4.1. Tanc de mescla TM-301

En aquest tanc de mescla TM-301 és on realitza una mescla entre els reactius, i el catalitzador, en aquest cas no hi ha reacció ja que obtenim un corrent de CCl_4 suficientment petit per a que no hi hagi reacció.. Per tant, es necessari que la corrent de sortida d'aquest tanc sigui homogeni i per tant s'ha d'assegurar que hi hagi una mescla perfecte.

A continuació es mostren els corrents d'entrada i sortida del tanc de mescla:

Taula 11.4.1.1. Corrents d'entrada i sortida del TM-301

	Corrent entrada vapor condensat	Corrent entrada líquids	Corrent sortida
Temperatura (°C)	-15	-15	-15
Pressió (atm)	7	7	7
Fracció de vapor	0	0	0
Cabal màssic (Kg/h)	5184	598	5782
Cabal volumètric (m ³ /h)	4,15	0,27	4,42
Densitat (Kg/m ³)	1287	2369	1286
FRACCIÓ MÀSSICA			
HF	0,081	0,034	0,076
SbCl ₅	0,087	0,844	0,165
HCl	0,298	0,016	0,269
FREON-11 (CCl ₃ F)	0,044	0,022	0,040
FREON-12 (CCl ₂ F ₂)	0,489	0,083	0,447
CABAL MÀSSIC (Kg/h)			
HF	420,7	20,6	441,30
SbCl ₅	451,9	504,9	956,80
HCl	1547,0	9,8	1556,80
FREON-11 (CCl ₃ F)	230,5	13,0	243,50
FREON-12 (CCl ₂ F ₂)	2533,90	49,6	2583,50

11.4.1.1. Dimensionat del tanc de mescla TM-301

Per tal d'elaborar el disseny del dimensionament del tanc de mescla, es calcula a partir del cabal de sortida, però en el nostre cas, com el cabal de sortida és igual al de la entrada, es igual quin corrent utilitzar per la base de càlcul. Els paràmetres necessaris per al dimensionament és

el cabal volumètric de sortida, la densitat del fluid, la viscositat i també el temps de residència, en aquest cas hem suposat un temps de residència de 1 hora, les propietats de mescla són les següents:

Densitat del fluid = 1286 Kg/m^3

Viscositat del fluid = $2,72 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$

Per al dimensionant es considera la relació 1,2 d'alçada- diàmetre, i a part es deixa un 15% de buit dintre del mesclador i tot es sobredimensiona un 15%.

El càlcul del volum ve determinat per:

$$V = \left(\frac{Q_{sortida}}{\rho_{fluid}} \cdot \tau + 15\%_{buit} \right) \cdot 1,15_{sobredimensionat} = 5,33 \text{ m}^3$$

Per tant, el diàmetre i l'alçada queden calculades de la següent forma:

$$D = \left(\frac{4 \cdot V}{1,2 \cdot \pi} \right)^{1/3} = 1,78 \text{ m}$$

$$H = 1,2 \cdot D = 2,14 \text{ m}$$

11.4.1.2. Sistema d'agitació

Per tal de procedir al disseny del agitador, partim en que la mescla ha de ser homogènia, és a dir, una mescla perfecta. Al ser un tanc amb més de 4 m^3 de volum, el sistema d'agitació ha de ser resistent.

A continuació es mostren les passos per al disseny del agitador de turbina:

· Càlcul del diàmetre del agitador (Da):

$$D_a = D/3 = 0,59 \text{ m}$$

· Càlcul de la distància al terra (E):

$$E = D/3 = 0,59 \text{ m}$$

· Càlcul de les plaques deflectores (J):

$$J = D/12 = 0,15 \text{ m}$$

De plaques deflectores es col·loquen 4, ja que és un valor estàndard. L'ús dels deflectors queda justificat com a un mètode per evitar la formació del vòrtex i augmentar la turbulència i millorar la transferència de matèria entre les diferents fases.

$$W = Da/5 = 0,12 \text{ m}$$

$$L = Da/4 = 0,15 \text{ m}$$

Per assegurar que la mescla és perfecta, considerem una velocitat de gir d'agitació (n) de 1,67 rps. D'aquesta forma, podem calcular el temps de mescla requerit en el TM-301 a partir de la següent equació:

$$t = 5 \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4 \cdot 0,92 \cdot n \cdot Da \cdot D} = 16,4 \text{ min}$$

Ara es procedirà al càlcul del Reynolds d'agitació (Re), que ens permetrà calcular la potència de l'agitador:

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot Da}{\mu} = 4,69 \times 10^6$$

Es troba un valor de $N_p = 6$.

$$P = \frac{N_p \cdot Da^5 \cdot n^3 \cdot \rho}{g \cdot 1000} = 0,27 \text{ kW}$$

Seguidament mostrarem la potència per metre cúbic, d'aquesta manera sabrem si el nostre disseny és correcte.

$$Power = \frac{P}{V_L} = \frac{P}{\frac{\text{cabal màssic sortida}}{\rho} \cdot \tau} = 0,06 \text{ kW/m}^3$$

Com es pot observar, la potencia per metre cúbic obtingut requereix una agitació mitjana, suficient per a que hi hagi una bona mescla entre L-L. Per tant, el càlcul del disseny es pot considerar com a bo.

11.4.1.3. Dimensionament mecànic

El material utilitzat per a la construcció del tanc de mescla TM-301 serà de Hastelloy B-2, ja que aquest tanc treballa amb components corrosius molt forts com són el HCl i el HF, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals d'aquest equip i estalviarem costos

de producció del equip. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1. S'utilitza el codi ASME per a la determinació del gruix de la paret de la columna. La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{0.385 \cdot S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C_1$$

Per al càlcul de la pressió de disseny i la temperatura de disseny s'utilitzen les següents equacions:

$$T_{disseny}^a = 0,5 T_{op}^a + 20 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

$$P_{disseny} = P_{op} + 25 \text{ (psi)}$$

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (110,2 psi).

R és el radi interior (35,1 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (110000 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

C₁ es la tolerància a la corrosió (0,078 inch).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,169 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 4,30 \text{ mm} \approx \mathbf{5 \text{ mm}}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (110,2 psi).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (110000 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

L és la longitud del cilindre i els dos fondos (84,20 inch)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,234 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 3,53 \text{ mm} \approx \mathbf{4 \text{ mm}}$$

El gruix del fons serà el que tindrà un valor major dels calculats per la pressió interna, en aquest cas el valor més gran correspon a la pressió exercida a les parets. Per tant el gruix del fons serà de 5 mm.

➤ Pes del tanc de mescla

Per tal de calcular el pes total del tanc, primerament calcularem el seu pes quan l'equip es troba totalment buit. Aquest pes es calcula a partir de la següent equació:

$$Pes_{tm.buit} = \pi \cdot D_m \cdot H \cdot t_{tm} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{tm} \cdot \rho_{mat.})$$

On:

D_m = Diàmetre tanc mescla (m)

H = Alçada tanc mescla (m)

t_{tm} = gruix del fons (7×10^{-3} m)

ρ_{mat} = densitat Hastelloy B-2 (9220 Kg/m³)

$$Pes_{tm.buit} = 630 \text{ Kg}$$

Seguidament calcularem el pes del líquid que serà circulant a través del tanc de mescla, d'aquesta manera sabrem el pes total d'aquest equip:

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{tm}}{2} \cdot \rho_L$$

On:

V_{tp} = Volum tanc de mescla (m³)

ρ_L = Densitat del líquid (1606 Kg/m³)

$$Pes_{líquid} = 1606 \text{ Kg}$$

$$Pes_{total} = Pes_{tp.buit} + Pes_{líquid} = \mathbf{2235 \text{ Kg}}$$

➤ Càlcul de l'espessor d'aïllament

El tanc de mescla s'ha de mantenir a una temperatura constant, que a de ser de -15°C , temperatura molt baixa degut a que els compostos que hi circulen necessiten aquestes condicions per a trobar-los en estat líquid. Seguidament mostrarem una taula dels diferents aïllants més utilitzats en plantes químiques:

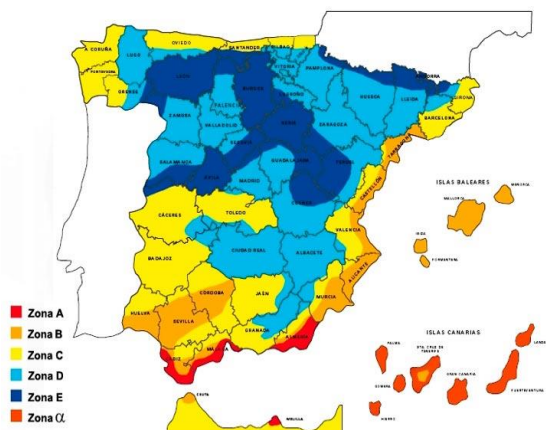
Taula 11.2.1.2.1: Diferents aïllants tèrmics més utilitzats en les plantes químiques.

Minerales	Plásticos
LANA DE VIDRIO Con encolado, 250°C Sin encolado, 500°C	POLIESTIRENO Expandido, 70°C Extrusionado, 85°C
LANA DE ROCA Hasta 750°C	POLIURETANO 100°C
FIBRA CERAMICA Hasta 1.500°C	

Degut a que treballem a -15°C i la màxima diferència de temperatura respecte a l'exterior no serà més de 60°C (diferència entre -15°C i 40°C que podríem arribar a l'estiu en condicions extremes), s'ha decidit utilitzar poliestirè expandit. Ara mostrarem una taula per tal de decidir quin gruix establir per a aquest aïllant:

Taula 11.2.1.2.2: Gruixos segons el tipus de coberta i segons la zona territorial

APLICACIONES MÁS HABITUALES	Espesor mínimo en cm. para no superar el valor U límite del CTE HE-1.				
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D	Zona E
CUBIERTA PLANA	6	7	7-8	8	8-9
CUBIERTA INCLINADA	6-7	7	7-8	8	9
FACHADA (aislamiento en cámara y por el interior)	4	5	5-6	6	8
FACHADA (aislamiento por el exterior)	4	4	4	5	6
SUELO (sobre espacio no calefactado)	5	5-6	5-6	5-6	5-6
SUELO (sobre exterior)	5-6	5-6	6	6	6



Gràcies a la taula anterior, sabent que ens trobem en la Zona C i que el nostre equip es pot considerar de coberta plana-inclinada, hem decidit utilitzar poliestirè expandit amb un gruix de 8 cm i una eficiència d'aïllament del 93% aproximadament.

➤ Càlcul de la cubeta de retenció

La cubeta de retenció en aquest cas només conté el tanc pulmó, de manera que:

$$V = 6 \text{ m}^3$$

Prenent una distància de separació entre la paret del recipient i la paret de la cubeta de 1.5 metres, les dimensions de la cubeta es calculen com:

$$L_{cubeta} = D_{tanc} + (2 \cdot 1,5) = 4,8 \text{ m}$$

$$W_{cubeta} = D_{tanc} + (2 \cdot 1,5) = 4,8 \text{ m}$$

Per tant, l'àrea total de la cubeta:

$$A_{cubeta} = 23 \text{ m}^2$$

Per a conèixer però l'àrea útil de la cubeta, cal contemplar l'àrea ocupada pel tanc. D'aquesta manera:

$$A_{\text{útil cubeta}} = 23 - \left(\pi \frac{D_{tanc}^2}{4} \right) = 20,5 \text{ m}^2$$

Finalment, per a calcular l'altura de la cubeta:

$$h_{cubeta} = \frac{23}{20,5} = 1,12 \text{ metres}$$

11.5. Columnes de destil·lació

La destil·lació és una operació bàsica que s'empra per separar dues o més líquids miscibles d'una mescla, o per separar el dissolvent dels soluts no volàtils. S'aplica, per tant, per separar i purificar substàncies. La destil·lació consisteix fonamentalment a escalfar la mescla fins a la seva ebullició; els vapors, refrigerats i condensats, es recullen en forma líquida.

Al llarg d'aquest projecte, hem desenvolupat quatre rectificacions contínues al procés, de les quals una d'elles és destinada a la obtenció de matèries primeres que són reciclades al procés, i una altre destinada per la separació del HCl residual.

11.5.1. Disseny columna de destil·lació CD-301

La primera columna de destil·lació és destinada a la separació del FREON-12 i HCl de la resta de components resultants en el corrent de sortida del primer reactor. D'aquesta manera obtenim per caps el FREON-12 que necessitem per al segon reactor i HCl que serà separat posteriorment a la segona destil·lació; per cues obtenim altres components que són reciclats al primer reactor.

Aquesta rectificació multicomponent s'ha dissenyat amb el programa de simulació Aspen Hysys 8.2, obtenint resultats que es poden observar a les taules 11.2.1.1 i 11.2.1.2

Taula 11.5.1.1: Resultats de la CD-301, per als diferents cabals

Propietat	Entrada columna	Destil·lat	Residu
Vapor	0	0	0
Temperatura (°C)	-15,0	-28,2	93,8
Pressió (KPa)	763,9	763,9	763,9
Flux molar (Kmol/h)	90,96	64,10	26,86
Flux màssic (Kg/h)	5782	4140	1642
Entalpia màssica (KJ/Kg)	-3862	-3732	2858
Flux de calor (KJ/h)	-2,29E+07	-1,54E+07	4,73E+06
CABALS MÀSSICS ENTRADA (Kg/h)			
HF		441,3	
HCl		1556,8	
FREON-11 (CCl ₃ F)		243,5	
FREON-12 (CCl ₂ F ₂)		2583,5	
SbCl ₅		956,8	

Per a la columna CD-301, primerament es va realitzar una simulació amb el mètode Short-cut amb Aspen Hysys 8.2, i posteriorment es va fer la simulació seguint el disseny de columnes segons el mètode rigorós. Els resultats obtinguts en la simulació amb Aspen Hysys 8.2 són els següents:

Taula 11.5.1.2: Resultats de la CD-301, obtinguts en la simulació al Aspen Hysys 8.2

Diàmetre (m)	0,61
Etales equilibri teòriques	19
HETP (m)	0,40
Màxima inundació (%)	65,8
Altura columna (m)	8,9
Pressió disseny (KPa)	837,9
ΔP/secció (KPa/m)	0,19
ΔP total (KPa)	1,43
Relació de reflux (L/D)	0,5

Per a comprovar les etapes teòriques d'equilibri obtingudes a la simulació, s'ha realitzat amb el mètode de separació multicomponent, utilitzant l'equilibri que s'obté amb l'ús dels coeficients d'Antoine, el qual es mostra en la taula 11.2.1.3.

Taula 11.5.1.3: Constants d'Antoine per a cada component de la CD-301

	Constants d'Antoine					
	A	B	C	D	E	F
HF	45,39	-3945,07	0	-4,98	1,17E-05	2,00
CCl₂F₂	58,26	-3890,83	0	-6,98	1,15E-05	2,00
CCl₄	74,22	-6240,14	0	-8,99	7,19E-06	2,00
HCl	62,36	-3202,30	0	-7,93	2,26E-05	2,00
CCl₃F	65,31	-5026,80	0	-7,82	8,39E-06	2,00
SbCl₅	35,10	-5306,71	0	-2,93	2,63E-18	2,00

Com a resultats teòrics, primerament hem obtingut les temperatures de destil·lat, aliment i reboiler, ja que el que hem fixat ha sigut una pressió de operació de 763,9 KPa. Seguint un procés iteratiu hem obtingut les següents temperatures:

$T_D = -27,4\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ similar a la temperatura de la taula 11.5.1.1 ($-28,2\text{ }^{\circ}\text{C}$)

$T_F = -14,5\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ similar a la temperatura de la taula 11.5.1.1 ($-15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

$T_R = 88,2\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ similar a la temperatura de la taula 11.5.1.1 ($87,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) Seguidament hem calculat el número d'etapes mínimes ($N_{\min}$) segons Fenske

$$N_{\min} = \frac{\ln \left[\left(\frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_D / \left(\frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_B \right]}{\ln \alpha} = 9,6$$

Després s'ha calculat la relació de reflux mínima segons Underwood:

Taula 11.5.1.4: Càlcul de $V_{\min}$ de la CD-301

	ϕ	$\alpha \cdot F \cdot z_i / (\alpha - \phi)$	$\alpha \cdot D \cdot x_d / (\alpha - \phi)$
HF	-	-69,04	0
CCl₂F₂	1,17	28,47	28,47
CCl₄	-	0,00	0
HCl	-	44,07	44,067
CCl₃F	-	-1,25	0
SbCl₅	-	-1,25	0
-	-	$V_{\min}$	72,54

Per Balanç de Matèria sabem que: $V_{\min} = L_{\min} + D \cdot 0,577N = 10$

$L_{\min} = 8,44\text{ Kmol/h} \rightarrow L/D)_{\min} = 0,132$

Finalment, podem obtenir el número d'etapes teòriques seguint la correlació de Gilliland:

Abscissa (eix x): $\frac{L/D - (L/D)_{\min}}{L/D + 1} = 0,245$

Ordenada (eix y): $\frac{N - N_{\min}}{N + 1} = 1 - \exp \left(\frac{1 + 54,4X}{11 + 117,2X} \times \frac{X - 1}{\sqrt{X}} \right) = 0,423$

Nº etapes teòriques (N) = 17,4 $\rightarrow$ similar a les etapes teòriques de la taula 11.5.1.2 (19 etapes).

Per tant, podem concloure que els resultats a la simulació amb Aspen Hysys 8.2 han sigut iguals als resultats teòrics obtinguts.

11.5.1.1. Selecció del tipus de columna

El disseny intern d'una columna de destil·lació és un aspecte molt important, ja que determina el bon funcionament d'aquesta. S'ha optat per utilitzar una columna de rebliment per diversos motius, el primer és que el rebliment provoca una menor caiguda de pressió a l'interior de la columna, per tant garanteix una correcta circulació dels components pel seu interior. La segona característica és que el corrent a destil·lar conté components àcids (corrosius), i el

rebliment és el més adequat per a treballar a aquestes condicions. Per últim, també ens hem decantat per a treballar amb una columna de rebliment perquè és òptim treballar amb aquests tipus de destil·lacions per a aquelles columnes d'un diàmetre més petit que 0,7 metres ; on la nostra columna té un diàmetre de 0,61 metres.

Per a un bon funcionament d'una columna de rebliment, al seu interior ha d'albergar diferents components, com és el seu propi rebliment, suports, distribuïdors, etc. La següent figura mostra les parts essencials d'una columna de rebliment amb tots els seus components:

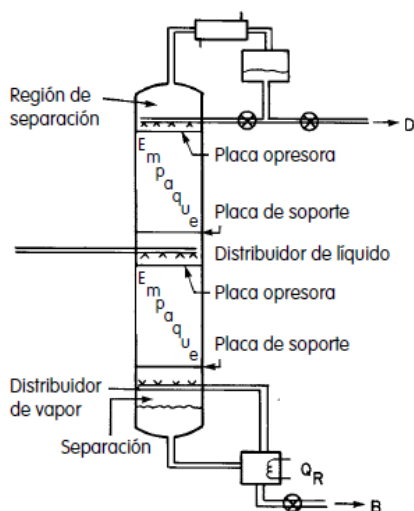


Figura 11.5.1.1.1: Components interns d'una columna de destil·lació.

➤ Selecció del tipus de rebliment

En les columnes de rebliment, l'operació de transferència de matèria es duu a terme de manera contínua. La funció principal del rebliment consisteix a augmentar la superfície de contacte entre el líquid i el vapor, augmentar la turbulència i per tant millorant l'eficàcia. A mesura que augmenta la grandària del

rebliment, disminueix l'eficiència de la transferència de matèria i augmenta la pèrdua de càrrega, per tant per determinar la grandària òptima de rebliment caldrà arribar a un compromís entre aquests dos factors. Es tenen diversos tipus de rebliment:

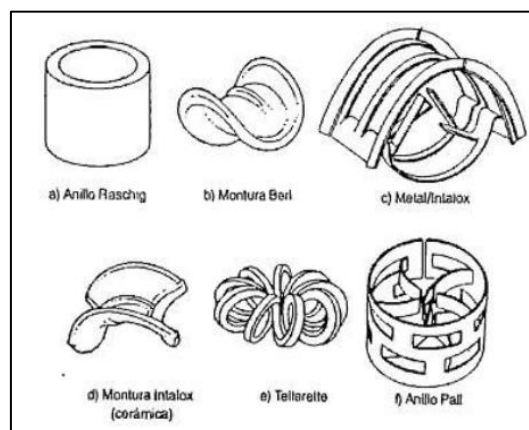


Figura 11.5.1.1.2: Tipus de rebliments al atzar

- Al atzar: aquest tipus de rebliment és bastant econòmic i sol ser de materials resistents a la corrosió. Els rebliments més empleats són els anells Rashig i les muntures Berl,

però ara han sigut reemplaçats per altres més eficients com els anells Pall, les muntures Intalox i els anells Bialecki.

- Estructurat: és bastant més car per unitat de volum que el rebliment al atzar, però ofereix molta menys pèrdua de càrrega per etapa i té major eficiència i capacitat.



Figura 11.5.1.1.3: Rebliment estructurat: Mellapak 250X de plàstic (empresa Sulzer).

La columna CD-301 funcionarà amb un tipus de rebliment estructurat a causa de les condicions de treball requerides. El tipus de rebliment triat és el Mellapak 250 X de plàstic de l'empresa Sulzer com es pot veure en la figura anterior. Aquest rebliment és del més utilitzat a tot el món, té un excel·lent rendiment en columnes amb diàmetres de fins a 15m, i òptim per treballar amb components corrosius. La caiguda de pressió per etapa teòrica és de 0.3-1 mbar.

➤ Distribuïdor de líquid

Es necessari disposar d'un distribuïdor líquid a la part superior de la columna, per tal d'assegurar de que el líquid ocupi uniformement tota l'àrea superficial del rebliment, evitant així mateix que el líquid es desplaci cap a les parets. En aquest cas s'ha escollit un distribuïdor VK de l'empresa Sulzer.

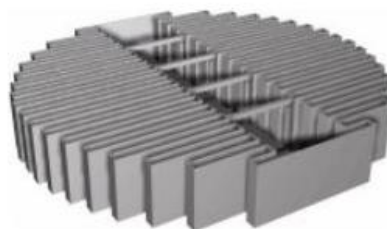


Figura 11.5.1.1.4: Distribuïdor VK (empresa Sulzer).

➤ Redistribució en la columna

Les columnes de rebliment utilitzen redistribuïdors de líquid per sobre de cada paquet de rebliment per proporcionar una distribució uniforme del líquid. La redistribució del líquid entre llits de rebliments millora l'eficiència. Una altra propietat que proporciona els redistribuïdors és suportar part del pes de la columna empacada que té pel damunt.

El col·lector SLT de Sulzer combina una reixeta de suport del rebliment amb un suport del líquid. Pot suportar les càrregues directes de rebliments amb àrees de superfície de fins 350 m²/m³. Aquest element es posa cada 6 metres d'altura de columna, per tant és necessari posar dos redistribuïdors en la columna CD-301.



Figura 11.5.1.1.5: Redistribuïdor amb suport SLT (empresa Sulzer).

➤ Suport de rebliment

En aquest cas solament s'utilitza un suport de rebliment en la part inferior de la columna a causa de que el redistribuïdor també ens fa de suport, el suport triat és l'ET de l'empresa Sulzer. Aquest es dissenyat amb plaques de degoteig per evitar la inundació prematura del rebliment.

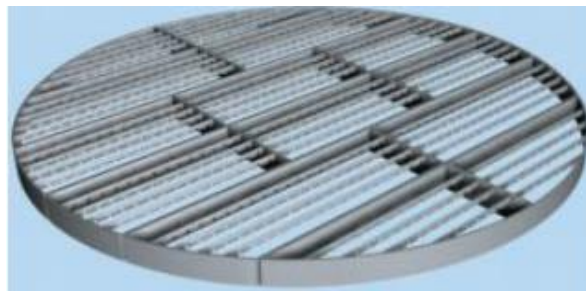


Figura 11.5.1.1.6: Suport de rebliment ET (empresa Sulzer)

➤ Entrada del líquid

L'entrada de l'aliment líquid a destil·lar es fa a través d'un injector de líquid LV que s'utilitza per als aliments 100% líquids i columnes amb un diàmetre inferior a 3 metres.

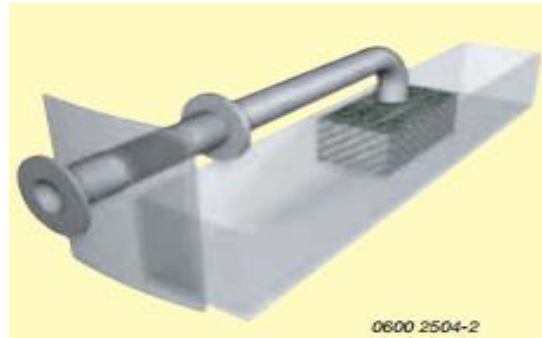


Figura 11.5.1.1.7: Injector del aliment líquid tipus LV (empresa Sulzer)

11.5.1.2. Disseny mecànic de la columna CD-301

El material utilitzat per a la construcció d'aquesta columna serà d'acer AISI-304L, recobert per una capa de tefló ja que aquesta columna treballa amb components corrosius, aquesta columna té una corrosió menor a altres tipus d'acer, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals d'aquest equip i estalviarem costos de producció del equip. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1. S'utilitza el codi ASME per a la determinació del gruix de la paret de la columna. La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{0.385 \cdot S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C_1$$

Per al càlcul de la pressió de disseny i la temperatura de disseny s'utilitzen les següents equacions:

$$T_{disseny}^a = 0,5 T_{op}^a + 20 \text{ (}^{\circ}\text{F)}$$

$$P_{disseny} = P_{op} + 25 \text{ (psi)}$$

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (121,5 psi).

R és el radi interior (12 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

C₁ es la tolerància a la corrosió (0,078 inch).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,281 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 7,15 \text{ mm} \approx \mathbf{8 \text{ mm}}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (121,5 psi).

R és el radi interior (12 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

L és la longitud del cilindre i els dos fondos (205,6 inch)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,949 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 24,1 \text{ mm} \approx \mathbf{25 \text{ mm}}$$

Ara calculem l'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió externa que s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{1,67 \cdot P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S - 0,2 \cdot 1,67 \cdot P}$$

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,305 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 7,8 \text{ mm} \approx \mathbf{8 \text{ mm}}$$

El gruix del fons serà el que tindrà un valor major dels calculats per la pressió externa i interna, en aquest cas el valor més gran correspon a la pressió interna degut a que es treballa a pressió. Per tant el gruix del fons serà de 25 mm.

➤ Altura de la columna

Per calcular l'altura real de la columna, s'ha de tenir en compte l'altura del capçal, per això s'utilitzen les següents relacions i equacions per trobar l'altura del capçal, les variables que corresponen provenen de la figura següent:

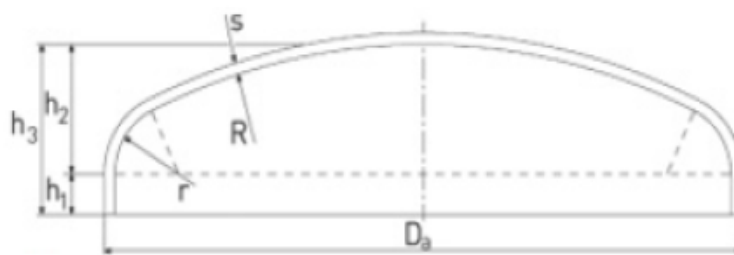


Figura 11.5.1.2.1. Mesures d'un capçal torièsferic

$$Di = Da$$

$$r = 0,1 \cdot Da$$

$$h1 \geq 3,5 \cdot t$$

$$h2 = 0,1935Da - 0,455t$$

$$h3 = h1 + h2$$

Per tant l'altura del capçal és la següent:

$$h_3 = 87,5 \text{ mm} + 106,7 \text{ mm} = 194,2 \text{ mm}$$

Una vegada que es coneix l'altura de la columna obtinguda a la simulació juntament amb l'altura del capçal, podem saber l'altura real de la columna CD-301.

$$Altura_{CD-301} = 8,9m + (2 \cdot 0,194m) = 9,3m$$

➤ Pes de la columna

Per al càlcul del pes de la columna cal sumar el pes de la columna buida, que correspon al pes de cadascun dels seus components (cilindre, fons, capçal i rebliment) i el pes del líquid en operació.

Per poder calcular el pes en buit es parteix de la quantitat de material necessària, que se sap a partir de les dimensions de la columna i l'espessor de la xapa.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot \rho$$

$$\dot{A}_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L$$

$$\dot{A}_{Toriesf.} = 0,842 \cdot D_c^2$$

El pes de la columna buida és la suma dels pesos dels diferents components de la qual la columna es troba formada:

$$Pes_{Colum.buida} = P_{cilind} + P_{capçal} + P_{fons} + P_{rebliment}$$

La densitat del acer AISI-304L és de 7930 kg/m3. La densitat del rebliment és de 1140 kg/m3.

$$Pes_{Colum.buida} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t_{cilin.} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{fons} \cdot \rho_{mat.}) + V_{rebl.} \cdot \rho_{mat.}$$

$$Pes_{Colum.buida} = 4323,1 \text{ Kg}$$

El pes del líquid es calcula a continuació, on la densitat del líquid és de 1418 Kg/m3:

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_L$$

$$\text{On } V_{columna} = 2 \cdot (0,078 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h$$

$$Pes_{líquid} = 1968,1 \text{ Kg}$$

Per tant, ja podem conèixer el pes total de la columna CD-301:

$$Pes_{TOTAL} = 6291,2 \text{ Kg}$$

➤ Disseny del faldó de la columna

Un dels suports més freqüents emprats en els recipients verticals és l'anomenat faldó. El faldó ha de suportar el pes de la columna. S'uneix a la columna per una soldadura contínua en la part inferior i, en general, la grandària requerida d'aquesta soldadura determina l'espessor del faldó.

L'altura del faldó és de 1,5 m i el material emprat és acer al carboni. Les columnes hauran d'anar dotades d'una escala, l'altura de la qual serà igual a l'altura de la columna i la seva amplària serà de 0.4m.

➤ Càlcul de l'espessor del aïllament

Per saber quin és l'aïllant més adequat per la nostra columna de destil·lació que treballa a temperatures negatives, ens fixarem en la taula següent on s'exposen els aïllants més utilitzats en la nostra indústria.

Minerales	Plàstics
LANA DE VIDRIO Con encolado, 250 °C Sin encolado, 500 °C LANA DE ROCA Hasta 750 °C FIBRA CERAMICA Hasta 1.500 °C	POLIESTIRENO Expandido, 70 °C Extrusionado, 85 °C POLIURETANO 100 °C

Com podem observar, segons els tipus d'aïllant que escollim podrem mantenir diferències de temperatura respecte l'exterior més o menys elevades. Suposem que es poden arribar a temperatures a l'estiu d'un màxim de 40 °C, i la temperatura que desitgem a l'interior de la columna oscil·la entre 89 °C que obtenim en cues i -28 °C que obtenim en caps; obtenint un diferencial de temperatura màxima entre l'ambient i la columna d'aproximadament 68 °C. Per tant, el material adequat per a aïllar els nostres tancs és l'aïllant mineral de poliuretà. Un cop elegit el material, hem de saber quin gruix d'aquest poliuretà és el necessari per a assegurar un bon aïllament del tanc. Per saber aquest gruix ens basem en la taula següent:

TEMPERATURA DE TRABAJO EQUIPO (°C)	ESPESOR AISLAMIENTO (mm)	MATERIAL AISLANTE	
		PANELES	MANTAS
100 150	70 90	PI-156	Telisol
200 250 300	110 120 140	PI-256	

Segons aquesta taula, per a un diferencial de temperatura de 68 °C es requereix un espessor de menys de 70 mm. Aquest espessor es suficient per a garantir l'aïllament del nostre tanc ja que el diferencial de temperatures màxim entre l'interior i l'exterior hem calculat que és de 68°C. Per tant, posarem un panell de poliuretà de 70 mm de gruix recobrint tota la superfície externa de la columna.

11.5.2. Disseny columna de destil·lació CD-302

La segona columna de destil·lació és destinada a la separació del FREON-12 i HCl. El clorur d'hidrogen que obtindrem per caps serà totalment pur, que serà destinat a una columna d'absorció amb aigua per tal de obtenir un HCl comercial, en canvi, per cues obtindrem el FREON-12 totalment pur que seguirà el procés continu cap a la entrada al segon reactor, que ens permetrà obtenir el FREON-13, producte del nostre interès.

Aquesta rectificació és binària i s'ha dissenyat amb el programa de simulació Aspen Hysys 8.2, obtenint resultats que es poden observar a les taules 11.2.2.1 i 11.2.2.2

Taula 11.5.2.1: Resultats de la CD-302, per als diferents cabals

Propietat	Entrada columna	Destil·lat	Residu
Vapor	0	1	0
Temperatura (°C)	-28,2	-38,2	33,3
Pressió (KPa)	810,6	810,6	810,6
Flux molar (Kmol/h)	64,13	42,71	21,42
Flux màssic (Kg/h)	4140	1557	2583
Entalpia màssica (KJ/Kg)	-3720	-2598	-4120
Flux de calor (KJ/h)	-2,13E+05	-8,96E+04	2,14E+04
CABALS MÀSSICS ENTRADA (Kg/h)			
HCl			1556,80
FREON-12 (CCl ₂ F ₂)			2583,50

Per a la columna CD-302, primerament es va realitzar una simulació amb el mètode Short-cut amb Aspen Hysys 8.2, i posteriorment es va fer la simulació seguint el disseny de columnes segons el mètode rigorós. Els resultats obtinguts en la simulació amb Aspen Hysys 8.2 són els següents:

Taula 11.5.2.2: Resultats de la CD-302, obtinguts en la simulació al Aspen Hysys 8.2

Diàmetre (m)	0,46
Etapas equilibri teòriques	21
HETP (m)	0,30
Màxima inundació (%)	63,6
Altura columna (m)	6,3
Pressió disseny (KPa)	884.6
ΔP /secció (KPa/m)	0,05
ΔP total (KPa)	0,32

Relació de reflux (L/D)	0,60
--------------------------------	------

Per a comprovar les etapes teòriques d'equilibri obtingudes a la simulació, s'ha realitzat amb el mètode binari McCabe, utilitzant l'equilibri que s'obté amb l'ús dels coeficients d'Antoine, el qual es mostrat en la taula 11.2.2.3.

Taula 11.5.2.3: Constants d'Antoine per a cada component de la CD-302

	A	B	C	D	E	F
HCl	62,36	-3202,3	0	-7,93	2,26E-05	2
CCl ₂ F ₂	58,26	-3890,8	0	-6,98	1,15E-05	2

Seguidament, hem calculat la pressió de vapor per a cada component, per tal de graficar la corba d'equilibri HCl-CCl₂F₂. D'aquesta manera hem pogut calcular el número d'etapes teòriques gràficament, tal i com podem observar a la figura següent:

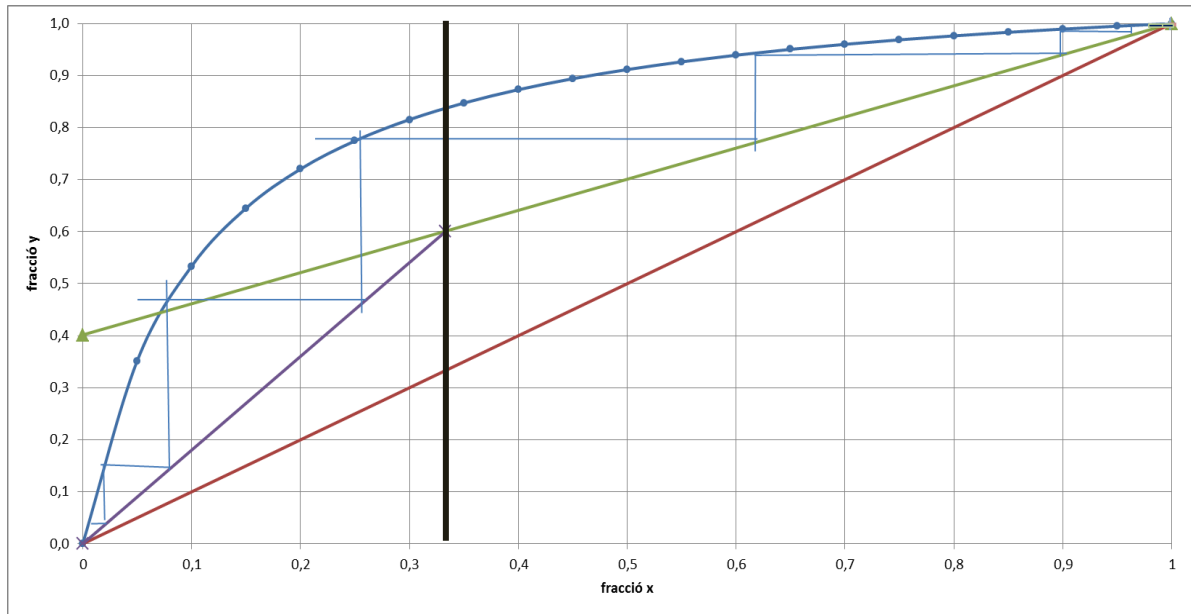


Figura 11.5.2.1: Corba d'equilibri HCl – CCl₂F₂

Per tal de assegurar un càlcul gràfic el més precís possible, com la separació es total, ja que obtenim els dos corrents purs de cada component, hi han 5 etapes en caps i 5 etapes en cues que són impossibles de graficar, però s'han tingut en compte a l'hora de considerar-les. Per tant podem dir que el plat 8 ha sigut el plat d'entrada (F) i la columna conté 19 etapes d'equilibri.

Nº etapes teòriques (N) = 19 → similar a les etapes teòriques de la taula 11.5.2.2(21 etapes).

Per tant, podem concloure que els resultats a la simulació amb Aspen Hysys 8.2 han sigut similars als resultats teòrics obtinguts.

11.5.2.1. Selecció del tipus de columna

En aquest cas, també utilitzem una columna de rebliment per diversos motius: el primer és que el rebliment provoca una menor caiguda de pressió a l'interior de la columna, el segon és degut a que destil·lem clorur d'hidrogen, on és un component molt corrosiu i treballar amb rebliment és el més adequat per a la seva destil·lació; i el tercer i últim, com en l'anterior columna, és adient treballar amb rebliment amb aquelles columnes amb un diàmetre més petit de 0,7 metres; en el nostre cas, tal i com figura a la taula 11.5.2.2, la nostra columna té un diàmetre de 0,46 metres.

➤ Selecció del tipus de rebliment

La columna CD-302 funcionarà amb un tipus de rebliment estructurat a causa de les condicions de treball requerides. El tipus de rebliment triat és el mateix que la columna CD-301, Mellapak 250 X de plàstic de l'empresa Sulzer (mirar figura 11.2.3). Té un excel·lent rendiment en columnes amb diàmetres de fins a 15m, i òptim per treballar amb components corrosius, com és el clorur d'hidrogen. La caiguda de pressió per etapa teòrica és de 0.3-1 mbar.

Seguidament mostrarem una taula amb els diferents components que formen la columna de destil·lació, on no entrarem amb detall degut a que els components són els mateixos que la columna CD-301.

Taula 11.5.2.1.1: Components mecànics de la columna de destil·lació CD-302

Distribuïdor de líquid	VK (Sulzer)
Redistribuïdors **	Col·lector SLT (Sulzer)
Suport de rebliment	Suport ET (Sulzer)
Entrada líquid	Injector tipus LV (Sulzer)

**En aquest cas, el col·lector SLT es posa cada 6 metres d'altura de columna, per tant és necessari posar un redistribuïdor en la columna CD-302, on en la columna CD-301 per la seva altura haviem de posar dos redistribuïdors.

11.5.2.2. Disseny mecànic de la columna CD-302

El material utilitzat per a la construcció d'aquesta columna també serà d'acer AISI-304L, recobert per una capa de tefló ja que aquesta columna treballa amb components corrosius. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1. A través del codi ASME podrem saber el gruix de la columna de destil·lació.

La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{0.385 \cdot S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1$$

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (142,6 psi).

R és el radi interior (9 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

C₁ es la tolerància a la corrosió (0,078 inch).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,179 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 4,6 \text{ mm} \approx \mathbf{5 \text{ mm}}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (142,6 psi).

R és el radi interior (9 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

L és la longitud del cilindre i els dos fondos (148,8 inch)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,818 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 20,8 \text{ mm} \approx \mathbf{21 \text{ mm}}$$

Ara calculem l'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió externa que s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{1,67 \cdot P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S - 0,2 \cdot 1,67 \cdot P}$$

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,163 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 4,2 \text{ mm} \approx \mathbf{5 \text{ mm}}$$

El gruix del fons serà el que tindrà un valor major dels calculats per la pressió externa i interna, en aquest cas el valor més gran correspon a la pressió interna degut a que es treballa a pressió. Per tant el gruix del fons serà de 21 mm.

➤ Altura de la columna

Per calcular l'altura real de la columna, com en la columna CD-301, s'ha de tenir en compte l'altura del capçal, per això s'utilitzen les següents relacions i equacions per trobar l'altura del capçal, les variables que corresponen provenen de la figura 11.5.1.2.1.

$$D_i = D_a$$

$$r = 0,1 \cdot D_a$$

$$h_1 \geq 3,5 \cdot t$$

$$h_2 = 0,1935 D_a - 0,455 t$$

$$h_3 = h_1 + h_2$$

Per tant l'altura del capçal és la següent:

$$h_3 = 73,5 \text{ mm} + 78,9 \text{ mm} = 152,4 \text{ mm}$$

Una vegada que es coneix l'altura de la columna obtinguda a la simulació juntament amb l'altura del capçal, podem saber l'altura real de la columna CD-302.

$$Altura_{CD-302} = 6,3m + (2 \cdot 0,152m) = 6,6m$$

➤ Pes de la columna

Per al càlcul del pes de la columna seguim el mateix procediment que per a la columna CD-301. Per poder calcular el pes en buit es parteix de la quantitat de material necessària, que se sap a partir de les dimensions de la columna i l'espessor de la xapa.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot \rho$$

$$\dot{A}_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L$$

$$\dot{A}_{Toriesf.} = 0,842 \cdot D_c^2$$

El pes de la columna buida és la suma dels pesos dels diferents components de la qual la columna es troba formada:

$$Pes_{Colum.buida} = P_{cilind} + P_{capçal} + P_{fons} + P_{rebliment}$$

La densitat del acer AISI-304L és de 7930 kg/m³. La densitat del rebliment és de 1140 kg/m³.

$$Pes_{Colum.buida} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t_{cilin.} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{fons} \cdot \rho_{mat.}) + V_{rebl.} \cdot \rho_{mat.}$$

$$Pes_{Colum.buida} = 1974,5 \text{ Kg}$$

El pes del líquid es calcula a continuació, on la densitat del líquid és de 1292 Kg/m³:

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_L$$

$$\text{On } V_{columna} = 2 \cdot (0,078 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h$$

$$Pes_{líquid} = 729,9 \text{ Kg}$$

Per tant, ja podem conèixer el pes total de la columna CD-302:

$$Pes_{TOTAL} = 2704,4 \text{ Kg}$$

➤ Disseny del faldó de la columna

El faldó ha de suportar el pes de la columna. S'uneix a la columna per una soldadura contínua en la part inferior i, en general, la grandària requerida d'aquesta soldadura determina l'espessor del faldó.

L'altura del faldó és de 1 m i el material emprat és acer al carboni. Les columnes hauran d'anar dotades d'una escala, l'altura de la qual serà igual a l'altura de la columna i la seva amplària serà de 0,4m.

➤ Càlcul de l'espessor del aïllament

En aquest cas, comparant-ho amb la columna anterior, podem dir que el aïllant tèrmic més adient a escollir ha sigut el poliuretà.

Suposant que es poden arribar a temperatures a l'estiu d'un màxim de 40 °C, i la temperatura que tenim a l'interior de la columna oscil·la entre 33 °C que obtenim en cues i -38 °C que obtenim en caps; ens dóna un diferencial de temperatura màxima entre l'ambient i la columna d'aproximadament 78 °C.

TEMPERATURA DE TRABAJO EQUIPO (°C)	ESPEJOR AISLAMIENTO (mm)	MATERIAL AISLANTE	
		PANELES	MANTAS
100 150	70 90	PI-156	Telsol
200 250 300	110 120 140	PI-256	

Segons aquesta taula, per a un diferencial de temperatura de 78 °C es requereix un espessor de menys de 70 mm. Aquest espessor es suficient per a garantir l'aïllament del nostre tanc ja que el diferencial de temperatures màxim entre l'interior i l'exterior hem calculat que és de 78°C. Per tant, posarem un panell de poliuretà de 70 mm de gruix recobrint tota la superfície externa de la columna.

11.5.3. Disseny columna de destil·lació CD-501

Aquesta següent columna correspon a la primera destil·lació després de la segona reacció, on es forma el FREON-13 (CClF_3), el nostre producte d'interès. En aquest cas, separem el CClF_3 de la resta de components, on els altres components són CCl_4 originat també com a producte de reacció, que serà reciclat al primer reactor, i CCl_2F_2 que no ha reaccionat que també serà reciclat, però al segon reactor, per tal d'obtenir més FREON-13.

Per tant, gràcies a aquesta columna, surt per caps tot el FREON-13 que s'ha format en la nostra producció contínua, d'aquesta manera obtenim el nostre producte d'interès que s'enviarà posteriorment al tanc d'emmagatzematge corresponent al FREON-13.

Aquesta rectificació multicomponent s'ha dissenyat amb el programa de simulació Aspen Hysys 8.2, obtenint resultats que es poden observar a les taules 11.5.3.1 i 11.5.3.2.

Taula 11.5.3.1: Resultats de la CD-501, per als diferents cabals

Propietat	Entrada columna	Destil·lat	Residu
Vapor	0	0	0
Temperatura (°C)	-15,1	-34,9	100,2
Pressió (KPa)	709,3	709,3	709,3
Flux molar (Kmol/h)	23,79	14,23	9,51
Flux màssic (Kg/h)	2872	1487	1385
Entalpia màssica (KJ/Kg)	-4270	-6819	-1467
Flux de calor (KJ/h)	-1,13E+05	-8,95E+04	1,11E+05
CABALS MÀSSICS ENTRADA (Kg/h)			
FREON-13 (CClF_3)		1487,60	

FREON-12 (CCl₂F₂)	286,90
CCl₄	1097,9

Per a la columna CD-501, primerament es va realitzar una simulació amb el mètode Short-cut amb Aspen Hysys 8.2, i posteriorment es va fer la simulació seguint el disseny de columnes segons el mètode rigorós. Els resultats obtinguts en la simulació amb Aspen Hysys 8.2 són els següents:

Taula 11.5.3.2: Resultats de la CD-501, obtinguts en la simulació al Aspen Hysys 8.2

Diàmetre (m)	0,305
Etapes equilibri teòriques	34
HETP (m)	0,30
Màxima inundació (%)	49,1
Altura columna (m)	10,2
Pressió disseny (KPa)	783,3
ΔP/secció (KPa/m)	0,11
ΔP total (KPa)	1,16
Relació de reflux (L/D)	0,75

Per a comprovar les etapes teòriques d'equilibri obtingudes a la simulació, s'ha realitzat amb el mètode de separació multicomponent, per tant, el procediment de càlcul és el mateix que en el cas de la CD-301.

Com a resultats teòrics, primerament hem obtingut les temperatures de destil·lat, aliment i reboiler, ja que el que hem fixat ha sigut una pressió de operació de 709,3 KPa. Seguint un procés iteratiu hem obtingut les següents temperatures:

$T_D = -34,9 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow$ igual a la temperatura de la taula 11.5.3.1 ($-26,3 \text{ } ^\circ\text{C}$)

$T_F = -17,3 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow$ similar a la temperatura de la taula 11.5.3.1 ($-15,1 \text{ } ^\circ\text{C}$)

$T_R = 97,3 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow$ similar a la temperatura de la taula 11.5.3.1 ($100,2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Seguidament hem calculat el número d'etapes mínimes ($N_{\min}$) segons Fenske:

$$N_{\min} = \frac{\ln \left[\left(\frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_D / \left(\frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_B \right]}{\ln \alpha} = 5.49$$

Seguidament, s'ha calculat la relació de reflux mínima segons Underwood:

Taula 11.5.3.3: Càlcul de $V_{\min}$ de la CD-501

	ϕ	$\alpha \cdot F \cdot z / (\alpha - \phi)$	$\alpha \cdot D \cdot x_d / (\alpha - \phi)$
CClF3	1,15	17,39	17,39
CCl2F2	-	-16,28	0
CCl4	-	-0,11	0
-	-	$V_{\min}$	17,39

Per Balanç de Matèria sabem que: $V_{\min} = L_{\min} + D$

$$L_{\min} = 3,16 \text{ Kmol/h} \rightarrow L/D_{\min} = 0,222$$

Finalment, podem obtenir el número d'etapes teòriques seguint la correlació de Gilliland:

$$\text{Abscissa (eix x): } \frac{L/D - (L/D)_{\min}}{L/D + 1} = 0,300$$

$$\text{Ordenada (eix y): } \frac{N - N_{\min}}{N + 1} = 1 - \exp\left(\frac{1 + 54,4X}{11 + 117,2X} \times \frac{X - 1}{\sqrt{X}}\right) = 0,823$$

Nº etapes teòriques (N) = 35 → similar a les etapes teòriques de la taula 11.5.3.2(29 etapes).

Per tant, podem concloure que els resultats a la simulació amb Aspen Hysys 8.2 han sigut iguals als resultats teòrics obtinguts.

11.5.3.1. Selecció del tipus de columna

En aquest cas, també utilitzem una columna de rebliment per diversos motius: el primer és que el rebliment provoca una menor caiguda de pressió a l'interior de la columna,; i el segon i últim, com en l'anterior columna, és adient treballar amb rebliment amb aquelles columnes amb un diàmetre més petit de 0,7 metres; en el nostre cas, tal i com figura a la taula 11.5.3.2, la nostra columna té un diàmetre de 0,305 metres.

➤ Selecció del tipus de rebliment

La columna CD-501 funcionarà amb un tipus de rebliment al atzar a causa de les condicions de treball requerides. En aquest cas, utilitzem aquest rebliment degut a que no necessitem un rebliment estructurat, ja que aquest és molt més car que treballar amb un rebliment al atzar. Les característiques d'aquest tipus de rebliment són el següents:

- Han de ser químicament inerts.
- Han de tenir una certa resistència mecànica elevada.
- Han de permetre el pas adequat dels dos corrents.
- Han de permetre un bon contacte entre les dues fases.

En aquest cas, hem utilitzat Anells Pall 1,5" de plàstic (proveïdor: Pall Ring Company Ltd.) degut als components que intervenen en la columna de destil·lació.



Figura 11.5.3.1.1: Mostres de rebliment anells Pall plàstic de diferents mides.

En la següent taula, mostrarem la quantitat del rebliment juntament amb el seu cost necessari per la columna CD-501.

Taula 11.5.3.1.1: Característiques quantitatives/cost rebliment (Anells Pall 1,5")

Est. Peces rebliment	10121,83
Est. Massa rebliment (Kg)	56,56
Est. Cost Rebliment (US\$)	339,38

Com podem veure, el cost del rebliment surt bastant més econòmic que utilitzar un rebliment estructurat, i encara més barat que utilitzar una columna de plats.

Seguidament mostrarem una taula amb els diferents components que formen la columna de destil·lació, on no entrarem amb detall degut a que els components són els mateixos que la columna CD-301 i CD-302.

Taula 11.5.3.1.2: Components mecànics de la columna de destil·lació CD-501

Distribuïdor de líquid	VK (Sulzer)
Redistribuïdors **	Col·lector SLT (Sulzer)
Suport de rebliment	Suport ET (Sulzer)
Entrada líquid	Injector tipus LV (Sulzer)

**En aquest cas, el col·lector SLT es posa cada 6 metres d'altura de columna, per tant és necessari posar dos redistribuïdors en la columna CD-501.

11.2.3.2. Disseny mecànic de la columna CD-501

El material utilitzat per a la construcció d'aquesta columna també serà d'acer AISI-304L, sense capa de tefló degut a que després del segon reactor no obtenim cap component corrosiu. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1.

La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{0.385 \cdot S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1$$

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (127,9 psi).

R és el radi interior (6 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

C₁ es la tolerància a la corrosió (0,039 inch).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,146 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 3,7 \text{ mm} \approx \mathbf{4 \text{ mm}}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (127,9 psi).

R és el radi interior (6 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

L és la longitud del cilindre i els dos fonsos (240,9 inch)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 1,11 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 28,2 \text{ mm} \approx \mathbf{29 \text{ mm}}$$

Ara calculem l'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió externa que s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{1,67 \cdot P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S - 0,2 \cdot 1,67 \cdot P}$$

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,264 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 6,7 \text{ mm} \approx \mathbf{7 \text{ mm}}$$

El gruix del fons serà el que tindrà un valor major dels calculats per la pressió externa i interna, en aquest cas el valor més gran correspon a la pressió interna degut a que es treballa a pressió. Per tant el gruix del fons serà de 29 mm.

➤ Altura de la columna

Per calcular l'altura real de la columna, com en la columna CD-301, s'ha de tenir en compte l'altura del capçal, per això s'utilitzen les següents relacions i equacions per trobar l'altura del capçal, les variables que corresponen provenen de la figura 11.5.1.2.1.

$$D_i = D_a$$

$$r = 0,1 \cdot D_a$$

$$h1 \geq 3,5 \cdot t$$

$$h2 = 0,1935Da - 0,455t$$

$$h3 = h1 + h2$$

Per tant l'altura del capçal és la següent:

$$h_3 = 101,5 \text{ mm} + 45,8 \text{ mm} = 147,3 \text{ mm}$$

Una vegada que es coneix l'altura de la columna obtinguda a la simulació juntament amb l'altura del capçal, podem saber l'altura real de la columna CD-501.

$$Altura_{CD-501} = 10,2m + (2 \cdot 0,147m) = 10,5m$$

➤ Pes de la columna

Per al càlcul del pes de la columna seguim el mateix procediment que per a la columna CD-301. Per poder calcular el pes en buit es parteix de la quantitat de material necessària, que se sap a partir de les dimensions de la columna i l'espessor de la xapa.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot \rho$$

$$À_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L$$

$$À_{Toriesf.} = 0,842 \cdot D_c^2$$

El pes de la columna buida és la suma dels pesos dels diferents components de la qual la columna es troba formada:

$$Pes_{Colum.buida} = P_{cilind} + P_{capçal} + P_{fons} + P_{rebliment}$$

La densitat del acer AISI-304L és de 7930 kg/m³.

$$Pes_{Colum.buida} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t_{cilin.} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{fons} \cdot \rho_{mat.}) + P_{rebliment}$$

$$Pes_{Colum.buida} = 2757,6 \text{ Kg}$$

El pes del líquid es calcula a continuació, on la densitat del líquid és de 1474 Kg/m³:

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_L$$

$$\text{On } V_{columna} = 2 \cdot (0,078 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h$$

$$Pes_{líquid} = 576,1 \text{ Kg}$$

Per tant, ja podem conèixer el pes total de la columna CD-501:

$$Pes_{TOTAL} = 3333,7 \text{ Kg}$$

➤ Disseny del faldó de la columna

El faldó ha de suportar el pes de la columna. S'uneix a la columna per una soldadura contínua en la part inferior i, en general, la grandària requerida d'aquesta soldadura determina l'espessor del faldó.

L'altura del faldó és de 1,5 m i el material emprat és acer al carboni. Les columnes hauran d'anar dotades d'una escala, l'altura de la qual serà igual a l'altura de la columna i la seva amplària serà de 0,4m.

➤ Càlcul de l'espessor del aïllament

En aquest cas, comparant-ho amb la columna anterior, podem dir que el aïllant tèrmic més adient a escollir ha sigut el cautxú sintètic que permet aïllar temperatures des de -50 a 175 °C.

Suposant que es poden arribar a temperatures a l'estiu d'un màxim de 40 °C, i la temperatura que tenim a l'interior de la columna oscil·la entre 100 °C que obtenim en cues i -35 °C que obtenim en caps; ens dóna un diferencial de temperatura màxima entre l'ambient i la columna d'aproximadament 75 °C.

Per a un diferencial de temperatura de 75 °C es requereix un espessor de menys de 70 mm. Aquest espessor es suficient per a garantir l'aïllament del nostre tanc. Per tant, posarem un panell de cautxú sintètic de 70 mm de gruix recobrint tota la superfície externa de la columna.

11.5.4. Disseny columna de destil·lació CD-502

Aquesta última columna de destil·lació correspon a la separació del CCl_4 del FREON-12 (CCl_2F_2); encara que siguin components que es poden reciclar al primer reactor, es preferible la seva separació per reciclar-los a cada reactor, de manera que el tetraclorur de carboni es destil·la per cues per tal de ser reciclat al primer reactor, d'aquesta manera disminuïm la quantitat de CCl_4 que haurem de comprar al proveïdor i a la vegada, gràcies a la seva recirculació, augmentem la producció de FREON-12 al primer reactor. Pel que correspon al FREON-12 que es destil·la per caps, es recicla al segon reactor per tal d'augmentar la producció de FREON-13, que és el nostre producte d'interès. Per tant, gràcies a aquesta columna de destil·lació, podem reciclar els components per tal d'operar eficientment en la nostra planta i a la vegada disminuir el cost de compra de les matèries primeres.

Aquesta rectificació binària s'ha dissenyat amb el programa de simulació Aspen Hysys 8.2, obtenint resultats que es poden observar a les taules 11.5.4.1 i 11.5.4.2.

Taula 11.5.4.1: Resultats de la CD-502, per als diferents cabals

Propietat	Entrada columna	Destil·lat	Residu
Vapor	0	1	0
Temperatura (°C)	79,2	25,1	140,3
Pressió (KPa)	506,6	506,6	506,6
Flux molar (Kmol/h)	9,51	2,37	7,14
Flux màssic (Kg/h)	1385	287	1098
Entalpia màssica (KJ/Kg)	-1492	-3957	-771,6
Flux de calor (KJ/h)	7,07E+04	1,09E+01	1,15E+05
CABALS MÀSSICS ENTRADA (Kg/h)			
FREON-12 (CCl_2F_2)			286,90
CCl_4			1097,90

Per a la columna CD-502, primerament es va realitzar una simulació amb el mètode Short-cut amb Aspen Hysys 8.2, i posteriorment es va fer la simulació seguint el disseny de columnes segons el mètode rigorós. Els resultats obtinguts en la simulació amb Aspen Hysys 8.2 són els següents:

Taula 11.5.4.2: Resultats de la CD-502, obtinguts en la simulació al Aspen Hysys 8.2

Diàmetre (m)	0,305
Etapas equilibri teòriques	10

HETP (m)	0,31
Màxima inundació (%)	53,4
Altura columna (m)	3,05
Pressió disseny (KPa)	580,6
ΔP /secció (KPa/m)	0,12
ΔP total (KPa)	0,38
Relació de reflux (L/D)	0,5

Per a comprovar les etapes teòriques d'equilibri obtingudes a la simulació, s'ha realitzat amb el mètode binari McCabe, utilitzant l'equilibri que s'obté amb l'ús dels coeficients d'Antoine, el qual es mostra en la taula 11.5.4.3.

Taula 11.5.4.3: Constants d'Antoine per a cada component de la CD-502

	A	B	C	D	E	F
CCl₄	74,22	-6240,14	0	-8,99	7,19E-06	2
CCl₂F₂	58,26	-3890,83	0	-6,98	1,15E-05	2

Seguidament, hem calculat la pressió de vapor per a cada component, per tal de graficar la corba d'equilibri CCl₄-CCl₂F₂. D'aquesta manera hem pogut calcular el número d'etapes teòriques gràficament, tal i com podem observar a la figura següent:

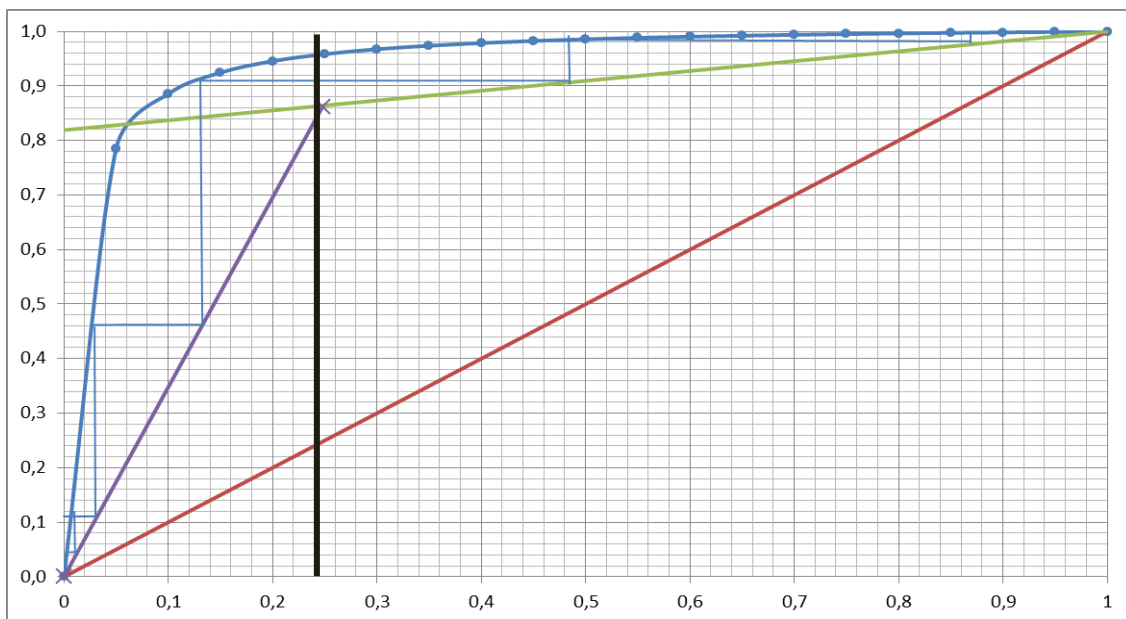


Figura 11.5.4.1: Corba d'equilibri CCl₄ – CCl₂F₂

Per aquesta columna, hem de tenir en compte que en cues hi han dues etapes que són impossibles de graficar, ja que la composició per arribar a 0,9999 de puresa del CCl_4 es necessiten dues etapes més on varia molt poc la composició. Per tant podem dir que el plat 4 ha sigut el plat d'entrada (F) i la columna conté 9 etapes d'equilibri.

Nº etapes teòriques (N) = 9 → similar a les etapes teòriques de la taula 11.5.4.2(10 etapes).

Per tant, podem concloure que els resultats a la simulació amb Aspen Hysys 8.2 han sigut similars als resultats teòrics obtinguts.

11.5.4.1. Selecció del tipus de columna

En aquest cas, també utilitzem una columna de rebliment per diversos motius: el primer és que el rebliment provoca una menor caiguda de pressió a l'interior de la columna,; i el segon i últim, com en l'anterior columna, és adient treballar amb rebliment amb aquelles columnes amb un diàmetre més petit de 0,7 metres; en el nostre cas, tal i com figura a la taula 11.5.4.2, la nostra columna té un diàmetre de 0,305 metres.

➤ Selecció del tipus de rebliment

La columna CD-502 funcionarà amb un tipus de rebliment al atzar a causa de les condicions de treball requerides. En aquest cas, utilitzem aquest rebliment degut a que no necessitem un rebliment estructurat, ja que aquest és molt més car que treballar amb un rebliment al atzar.

En aquest cas, hem utilitzat Anells Raschig 0,75" de ceràmica (proveïdor: MTE B.V.) degut als components que intervenen en la columna de destil·lació. En aquest cas no hem utilitzat Anells Pall degut a que les dimensions de la columna són tan petites en comparació a la resta que es necessari un altre tipus de rebliment a l'atzar per establir una bona separació dels dos components a separar. Si agafem anells Pall de 0,625"; obtenim altes velocitats d'inundació del gas; en canvi, per a anells Raschig de 0,75" obtenim una velocitat d'inundació baixa. Per això, ens hem decidit en treballar amb un rebliment d'anells Raschig 0,75" de ceràmica .



Figura 11.5.4.1.1: Mostres de rebliment anells Raschig ceràmica de diferents mides

En la següent taula, mostrarem la quantitat del rebliment juntament amb el seu cost necessari per la columna CD-502.

Taula 11.5.4.1.1: Característiques quantitatives/cost rebliment (Anells Pall 1,5")

Est. Peçes rebliment	24420
Est. Massa rebliment (Kg)	118,50
Est. Cost Rebliment (US\$)	220,00

Com podem veure, el cost del rebliment surt bastant més econòmic que utilitzar un rebliment estructurat, i encara més barat que utilitzar una columna de plats.

Seguidament mostrarem una taula amb els diferents components que formen la columna de destil·lació.

Taula 11.5.4.1.2: Components mecànics de la columna de destil·lació CD-502

Distribuïdor de líquid	VK (Sulzer)
Redistribuïdors **	Col·lector SLT (Sulzer)
Suport de rebliment	Suport ET (Sulzer)
Entrada líquid	Injector tipus LV (Sulzer)

**En aquest cas, el col·lector SLT es posa cada 6 metres d'altura de columna, per tant és necessari posar un redistribuïdor en la columna CD-502.

11.5.4.2. Disseny mecànic de la columna CD-502

El material utilitzat per a la construcció d'aquesta columna també serà d'acer AISI-304L sense capa de tefló degut a que després del segon reactor no obtenim cap component corrosiu. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1.

La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{0.385 \cdot S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1$$

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (98,5 psi).

R és el radi interior (6 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

C₁ es la tolerància a la corrosió (0,039 inch).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,121 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 3,1 \text{ mm} \approx \mathbf{4 \text{ mm}}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (98,5 psi).

R és el radi interior (6 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (18800 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

L és la longitud del cilindre i els dos fondos (144,1 inch)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,54 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 13,6 \text{ mm} \approx \mathbf{14 \text{ mm}}$$

Ara calculem l'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió externa que s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{1,67 \cdot P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S - 0,2 \cdot 1,67 \cdot P}$$

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,158 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 4,1 \text{ mm} \approx \mathbf{5 \text{ mm}}$$

El gruix del fons serà el que tindrà un valor major dels calculats per la pressió externa i interna, en aquest cas el valor més gran correspon a la pressió interna degut a que es treballa a pressió. Per tant el gruix del fons serà de 14 mm.

➤ Altura de la columna

Per calcular l'altura real de la columna, com en la columna CD-301, s'ha de tenir en compte l'altura del capçal, per això s'utilitzen les següents relacions i equacions per trobar l'altura del capçal, les variables que corresponen provenen de la figura 11.2.8.

$$D_i = D_a$$

$$r = 0,1 \cdot D_a$$

$$h_1 \geq 3,5 \cdot t$$

$$h_2 = 0,1935 D_a - 0,455 t$$

$$h_3 = h_1 + h_2$$

Per tant l'altura del capçal és la següent:

$$h_3 = 49 \text{ mm} + 52,6 \text{ mm} = 101,6 \text{ mm}$$

Una vegada que es coneix l'altura de la columna obtinguda a la simulació juntament amb l'altura del capçal, podem saber l'altura real de la columna CD-502.

$$\mathbf{Altura_{CD-502} = 3,05m + (2 \cdot 0,101m) = 3,25m}$$

➤ Pes de la columna

Per al càlcul del pes de la columna seguim el mateix procediment que per a la columna CD-301. Per poder calcular el pes en buit es parteix de la quantitat de material necessària, que se sap a partir de les dimensions de la columna i l'espessor de la xapa.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot \rho$$

$$\dot{A}_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L$$

$$\dot{A}_{Toriesf.} = 0,842 \cdot D_c^2$$

El pes de la columna buida és la suma dels pesos dels diferents components de la qual la columna es troba formada:

$$Pes_{Colum.buida} = P_{cilind} + P_{capçal} + P_{fons} + P_{rebliment}$$

La densitat del acer AISI-304L és de 7930 kg/m³.

$$Pes_{Colum.buida} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t_{cilin.} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{fons} \cdot \rho_{mat.}) + P_{rebliment}$$

$$Pes_{Colum.buida} = 651,2 \text{ Kg}$$

El pes del líquid es calcula a continuació, on la densitat del líquid és de 1419 Kg/m³:

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_L$$

$$On \ V_{columna} = 2 \cdot (0,078 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h$$

$$Pes_{líquid} = 178,8 \text{ Kg}$$

Per tant, ja podem conèixer el pes total de la columna CD-502:

$$Pes_{TOTAL} = 830 \text{ Kg}$$

➤ Disseny del faldó de la columna

El faldó ha de suportar el pes de la columna. S'uneix a la columna per una soldadura contínua en la part inferior i, en general, la grandària requerida d'aquesta soldadura determina l'espessor del faldó.

L'altura del faldó és de 1 m i el material emprat és acer al carboni. Les columnes hauran d'anar dotades d'una escala, l'altura de la qual serà igual a l'altura de la columna i la seva amplària serà de 0,4m.

➤ Càlcul de l'espessor del aïllament

En aquest cas, comparant-ho amb la columna anterior, podem dir que el aïllant tèrmic més adient a escollir ha sigut la llana de vidre.

Suposant que es poden arribar a temperatures a l'estiu d'un màxim de 40 °C, i la temperatura que tenim a l'interior de la columna oscil·la entre 140 °C que obtenim en cues i 25 °C que obtenim en caps; ens dóna un diferencial de temperatura màxima entre l'ambient i la columna d'aproximadament 115 °C.

TEMPERATURA DE TRABAJO EQUIPO (°C)	ESPESOR AISLAMIENTO (mm)	MATERIAL AISLANTE	
		PANELES	MANTAS
100 150	70 90	PI-156	Telisol
200 250 300	110 120 140	PI-256	

Segons aquesta taula, per a un diferencial de temperatura de 115 °C es requereix un espessor entre 70-90 mm. Per tant, posarem un panell de llana de vidre de 90 mm per assegurar que la columna es troba totalment aïllada de l'exterior.

11.6. Columna d'absorció CA-301

El corrent de sortida de gasos de la columna CD-302 s'obté clorur d'hidrogen que s'ha de sotmetre a un procés d'absorció amb aigua per tal d'obtenir una dissolució d'àcid clorhídric al 35% en pes. D'aquesta manera obtenim un corrent líquid amb àcid clorhídric en solució preparat per la seva venta i a la vegada netegem el corrent gasós, per tant, després d'aquesta absorció obtenim un gas lliure de contaminant, complint els seus límits d'abocament a l'atmosfera. El sistema HCl/H₂O formen una mescla azeotròpica amb una temperatura d'ebullició de 108,6 °C per a un sistema de 1 bar de pressió. Seguidament mostrarem el diagrama d'equilibri HCl-aigua:

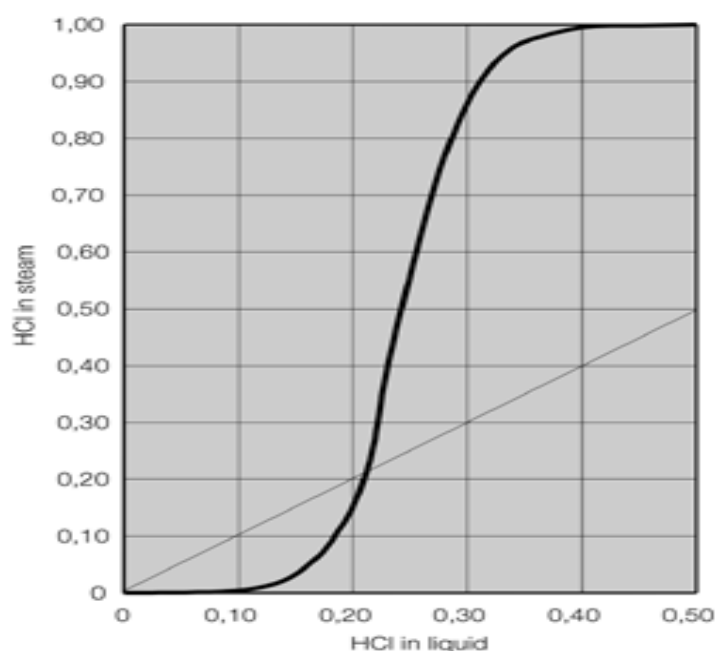


Figura 11.6.1: Gràfic d'equilibri HCl/H₂O

L'absorció de HCl en aigua es comporta fortament exotèrmica. Per tant l'eliminació necessària d'energia d'absorció es dona de diferents maneres, almenys per a composicions pures de HCl, que són principalment els processos d'absorció adiabàtica o bé isoterma; en el nostre cas es duu a terme una absorció adiabàtica, és a dir, que no intercanvia calor amb el seu entorn.

En aquest cas utilitzem un corrent d'un component gasós inert en la absorció HCl/H₂O, com és el cas de l'aire. L'aire permet obtenir un perfil de temperatures dins de la columna que es difereix d'una manera paral·lela si el gas inert està present, de manera que perfil de temperatures es manté sense canvis. Per tant, en el corrent d'entrada de gasos en la columna, entra una mescla del HCl/aire amb una relació de 0,1/0,9 volumètrica respectivament.

Seguidament mostrarem la taula de corrents d'entrada i sortida de la columna d'absorció:

Taula 11.6.1: Resultats de la CA-301, per als diferents cabals

Propietat	Entrada HCl+aire	Entrada aigua servei	Entrada aigua recirc.	HCl (35%)	Sortida caps
Vapor	1	0	0	0	1
Temperatura (°C)	-40,7	30	35	61,2	95,9
Pressió (KPa)	101,3	101,30	101,3	101,3	101,3
Flux molar (Kmol/h)	50,4	161	48,5	203	56,9

Flux màssic (Kg/h)	1780,3	2900	879,5	4449,2	1110,8
CABALS MÀSSICS (Kg/h)					
Aigua	-	2900	879,5	2892,2	887,3
Aire	223,5	-	-	-	223,5
HCl	1556,8	-	-	1556,8	-
FRACCIONS MÀSSIQUES					
Aigua	-	1	1	0,65	0,8
Aire	0,13	-	-	-	0,2
HCl	0,87	-	-	0,35	-

Per tal de dimensionar la columna d'absorció hem utilitzat el programa Aspen Hysys 8.2, ja que ens dona tota la informació necessària per al seu disseny: pressió de treball, el número d'etapes teòriques, les característiques d'entrada i sortida de l'absorbidor, i també un disseny exhaust del diàmetre, alçada, i tipus de reblliment de la columna.

Els resultats obtinguts en la simulació amb Aspen Hysys 8.2 són els següents:

Taula 11.6.2: Resultats de la CA-301, amb el simulador Aspen Hysys 8.2

Diàmetre (m)	0,61
Etapes equilibri teòriques	10
HETP (m)	0,4
Màxima inundació (%)	65,3
Altura columna (m)	3,6
Pressió disseny (KPa)	101,3
ΔP/secció (KPa/m)	0,27
ΔP total (KPa)	0,97

11.6.1. Selecció del tipus de columna d'absorció

El primer pas per a decidir quin tipus de columna d'absorció utilitzar, és a dir, decidir si la columna serà de reblliment o bé de plats. Per tant, primer mostrarem les avantatges de cada tipus de columna.

Si es decideix que la columna sigui de plats cal saber que:

- Diàmetres de columna grans (<0,7m)

- Cabals elevats
- Temps de residència de líquids elevats

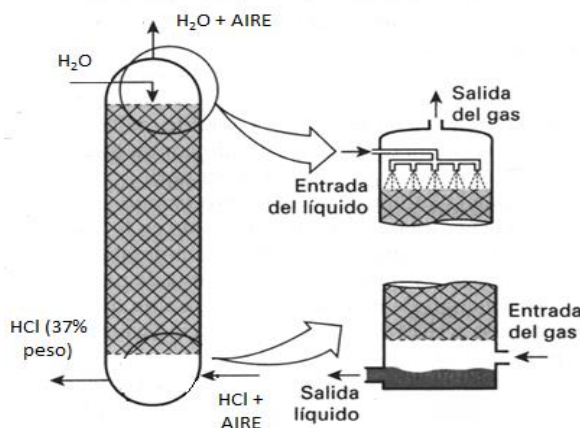
Si es decideix que la columna sigui de rebliment cal saber que:

- Diàmetres de columna petits ($>0,7\text{m}$)
- Absorcions a baixa pressió
- Òptima per a substàncies corrosives

Degut a aquests trets més característics de cada tipus de columna, s'ha decidit utilitzar una columna de rebliment, ja que el diàmetre obtingut és petit (tal i com es mostra a la taula 11.6.2), la absorció treballa a pressió atmosfèrica i també l'àcid clorhídric comporta un alt grau de corrosió, on la columna de rebliment és més òptima per a treballar amb substàncies corrosives que no la de plats.

11.6.2. Selecció del tipus de flux de la columna

En una columna d'absorció es pot treballar en contracorrent o bé en cocorrent. Per poder transferir la màxima quantitat de matèria entre fases i minimitzar els costos d'operació es decideix operar en contracorrent. Per tant, el corrent d'entrada d'aigua entra just per sobre del primer plat i el corrent d'entrada de la mescla HCl/aire entra per sota de l'últim plat.



Taula 11.6.2.1: Columna d'absorció del HCl en contracorrent.

11.6.3. Selecció del tipus de rebliment

Las alçades del rebliments dintre de la columna són variades i depenen del tipus de material utilitzat en el rebliment com de la pèrdua de carrega que hi pot haver a la secció. Per a

rebliments de material ceràmics que poden sofrir deformació el limiten de 3 a 4 m d'alçada mentre que els metàl·lics poden suportar fins a 7,5 m.

La columna CA-301 funcionarà amb un tipus de rebliment al atzar a causa de les condicions de treball requerides. En aquest cas, utilitzem aquest rebliment degut a que no necessitem un rebliment estructurat, ja que aquest és molt més car que treballar amb un rebliment al atzar.

En aquest cas, hem utilitzat Intalox Saddles 2" de ceràmica (proveïdor: Koch-glitsch), ja que és el més eficient per al disseny d'aquesta columna, també s'ha decidit utilitzar un rebliment ceràmic ja que és un material que suporta molt bé la corrosió provocada per l'àcid clorhídric.



Figura 11.6.3.1: Mostres de rebliment Intalox Saddles ceràmic

En la següent taula, mostrarem la quantitat del rebliment juntament amb el seu cost necessari per la columna CA-301.

Taula 11.6.3.1: Característiques quantitatives/cost rebliment (Intalox Saddles 2")

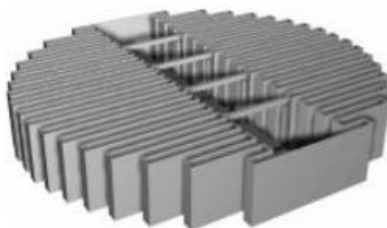
Est. Peçes rebliment	9877
Est. Massa rebliment (Kg)	798,5
Est. Cost Rebliment (US\$)	352

11.6.4 Parts internes de la columna de rebliment

➤ Distribuidor de líquid

Es necessari disposar d'un distribuïdor líquid a la part superior de la columna. EL líquid que entra a la columna s'aboca sobre el distribuïdor i allí es reparteix per la part superior del empaquetat al que deu humidificar de forma uniforme. En aquest cas s'ha escollit un distribuïdor VK de l'empresa Sulzer.

Figura 11.6.4.1: Distribuïdor VK (empresa Sulzer).



➤ Redistribució en la columna

Les columnes de rebliment utilitzen redistribuïdors de líquid per sobre de cada paquet de rebliment per proporcionar una distribució uniforme del líquid. La redistribució del líquid entre llits de rebliments millora l'eficiència. Una altra propietat que proporciona els redistribuïdors és suportar part del pes de la columna empaçada que té pel damunt.

El col·lector SLT de Sulzer combina una reixeta de suport del rebliment amb un suport del líquid. Pot suportar les càrregues directes de rebliments amb àrees de superfície de fins 350 m²/m³. Aquest element es posa cada 6 metres d'altura de columna, per tant és necessari posar un redistribuïdor en la columna CA-301.

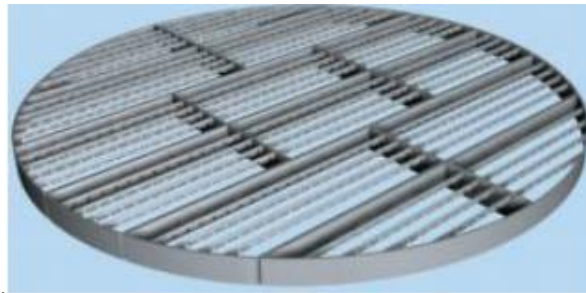
Figura 11.6.4.2: Redistribuïdor amb suport SLT (empresa Sulzer).



➤ Suport de rebliment

En aquest cas solament s'utilitza un suport de rebliment en la part inferior de la columna a causa de que el redistribuidor també ens fa de suport, el suport triat és l'ET de l'empresa Sulzer. Aquest es dissenyat amb plaques de degoteig per evitar la inundació prematura del rebliment.

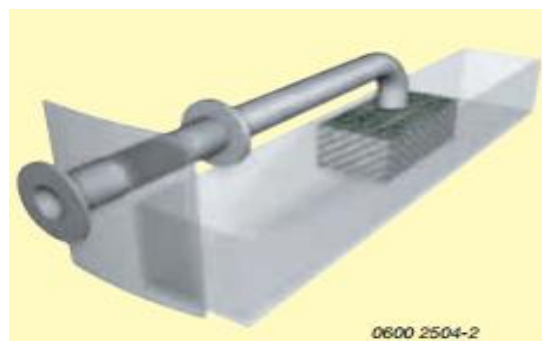
Figura 11.6.4.3: Suport de rebliment ET (empresa Sulzer)



➤ Entrada del líquid

L'entrada de l'aliment líquid a destil·lar es fa a través d'un injector de líquid LV que s'utilitza per als aliments 100% líquids i columnes amb un diàmetre inferior a 3 metres.

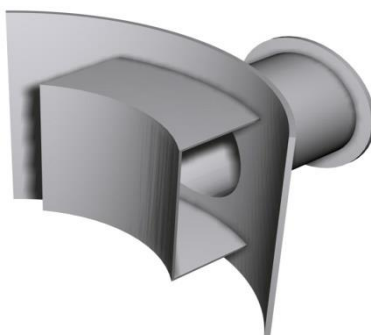
Figura 11.6.4.4: Injector del aliment líquid tipus LV (empresa Sulzer)



➤ Entrada de vapor

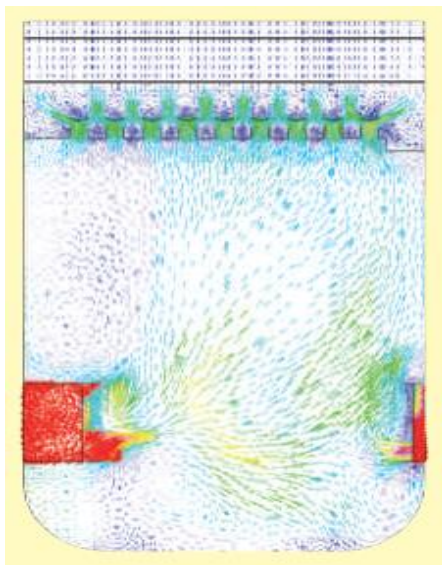
La distribució del vapor es menys crítica que la del líquid, tan mateix, es molt més complicada que dissenyar que els distribuïdors del líquids. Es fa a través d'un injector de vapor GDP que s'utilitza per als aliments de vapor i columnes amb un diàmetre inferior a 3 metres. Que permet una bona circulació del vapor per dins de la columna.

Figura 11.6.4.5: Injector del aliment vapor tipus GDP (empresa Sulzer)



Seguidament es mostrarà una simulació del flux de vapor d'entrada a la columna d'absorció:

Figura 11.6.4.6: Simulació del flux de vapor d'entrada a la columna CA-301



11.6.5. Disseny mecànic de la columna CA-301

El material utilitzat per a la construcció d'aquesta columna serà de Hastelloy B-2, és un material que s'obté a partir de la mescla entre níquel-molibdè amb una alta resistència a l'àcid clorhídric a qualsevol temperatura i concentració, component a absorbir en la columna CA-301, aquesta columna té una corrosió menor al acer, per tant amb aquest material cobrirem les necessitats operacionals encara que el cost de l'equip és elevat en comparació a altres materials. Es considera que els acabats es faran amb un radiografiat de E=1. S'utilitza el codi ASME per a la determinació del gruix de la paret de la columna. La equació empleada per a l'element cilíndric en funció del radi és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1$$

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (14,7 psi).

R és el radi interior (24 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (110000 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

C₁ es la tolerància a la corrosió (0,078 inch).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,081 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 2,1 \text{ mm} \approx \mathbf{2 \text{ mm}}$$

L'espessor del fons i el cap torisfèric en funció de la pressió interna s'obté a partir de la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot E \cdot S - 0,2 \cdot P} + C_1$$

On:

t és el espessor mínim requerit (inch).

P és la pressió de disseny o pressió màxima de treball permesa (14,7 psi).

R és el radi interior (24 inch).

S és el valor del esforç màxim permès del material a la temperatura de disseny (110000 psi)

E és el coeficient de soldadura, soldadura doble amb radiografiat total (E=1).

L és la longitud del cilindre i els dos fons (155,9 inch)

M és la relació entre la longitud i el radi intern del fons (1,31).

El valor obtingut es sobredimensiona fins a un valor arrodonit:

$$t = 0,092 \text{ inch} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ inch}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 2,3 \text{ mm} \approx \mathbf{2 \text{ mm}}$$

El gruix del fons té el mateix gruix que el cilindre, per tant el gruix del fons serà de 2 mm.

➤ Altura de la columna

Per calcular l'altura real de la columna, com en les columnes de destil·lació, s'ha de tenir en compte l'altura del capçal, per això s'utilitzen les següents relacions i equacions per trobar l'altura del capçal, les variables que corresponen provenen de la figura 11.2.8.

$$Di = Da$$

$$r = 0,1 \cdot Da$$

$$h1 \geq 3,5 \cdot t$$

$$h2 = 0,1935Da - 0,455t$$

$$h3 = h1 + h2$$

Per tant l'altura del capçal és la següent:

$$h_3 = 7 \text{ mm} + 115 \text{ mm} = 122 \text{ mm}$$

Una vegada que es coneix l'altura de la columna obtinguda a la simulació juntament amb l'altura del capçal, podem saber l'altura real de la columna CA-301.

$$\mathbf{Altura_{CA-301} = 3,6 \text{ m} + (2 \cdot 0,122 \text{ m}) = 3,84 \text{ m}}$$

➤ Pes de la columna

Per al càlcul del pes de la columna seguim el mateix procediment que per a les columnes de destil·lació. Per poder calcular el pes en buit es parteix de la quantitat de material necessària, que se sap a partir de les dimensions de la columna i l'espessor de la xapa.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot \rho$$

$$\dot{A}_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L$$

$$\dot{A}_{Toriesf.} = 0,842 \cdot D_c^2$$

El pes de la columna buida és la suma dels pesos dels diferents components de la qual la columna es troba formada:

$$Pes_{Colum.buida} = P_{cilind} + P_{capçal} + P_{fons} + P_{rebliment}$$

La densitat del Hastelloy B-2 és de 9220 kg/m³.

$$Pes_{Colum.buida} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t_{cilin.} \cdot \rho_{mat.} + 2 \cdot (0,842 \cdot t_{fons} \cdot \rho_{mat.}) + P_{rebliment}$$

$$Pes_{Colum.buida} = 965,3 \text{ Kg}$$

El pes del líquid-vapor es calcula a continuació, on la densitat del vapor-líquid és de 1060 Kg/m³:

$$Pes_{V-L} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_{V-L}$$

$$\text{On } V_{columna} = 2 \cdot (0,078 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h$$

$$Pes_{líquid} = 625,5 \text{ Kg}$$

Per tant, ja podem conèixer el pes total de la columna CA-301:

$$Pes_{TOTAL} = 1590,8 \text{ Kg}$$

➤ Disseny del faldó de la columna

El faldó ha de suportar el pes de la columna. S'uneix a la columna per una soldadura contínua en la part inferior i, en general, la grandària requerida d'aquesta soldadura determina l'espessor del faldó.

L'altura del faldó és de 1 m i el material emprat és acer al carboni. Les columnes hauran d'anar dotades d'una escala, l'altura de la qual serà igual a l'altura de la columna i la seva amplària serà de 0,4m.

➤ Càlcul de l'espessor del aïllament

Per al càlcul del tipus d'aïllament i el seu espessor, primerament ens hem de fixar en la taula 11.6.1. Com es pot veure la màxima temperatura que s'assoleix en la columna és de 96 °C, per tant considerem aquesta temperatura per a calcular l'espessor d'aïllament. Per a aïllar la columna d'absorció, s'empra l'aïllant de llana de roca que es calcula el seu gruix a partir d'un programa de càlcul anomenat CALORCOL, de la empresa Calorcol S.A. Els resultats obtinguts són els següents:



CALORCOL S.A.

INFORME TÉCNICO - TRANSFERENCIA DE CALOR PARA SUPERFICIES PLANAS (CALOR)

PRODUCTO: MANTAS AISLANTES DE 80 kg/m³ FECHA: 30/04/2015

Empresa que realiza el estudio: Calorcol S.A.

DATOS DE ENTRADA

Producto	Mantas Aislantes de 80 kg/m³
Temperatura Interior	°C 96.0
Temperatura Superficie Aislam. supuesta	°C 35.0
Temperatura Ambiente	°C 16.0
Velocidad del Aire	mi/h 8.39
Material Superficie Aislamiento	ACERO INOXIDABLE EN SERVICIO (USADO)
Emisividad Superficie Aislamiento	0.3
Material Superficie Desnuda	ACERO INOXIDABLE
Emisividad Superficie Desnuda	0.3

SUPERFICIE PLANA HORIZONTAL CARA HACIA ARRIBA

		EXACTO	RECOMENDADO
Temperatura de la Superficie	°C	24.51	24.32
Temperatura Media	°C	140.46	140.29
Coefficiente de Conductividad Térmica	BTU plg/pie² h °F	0.28	0.28
Conductancia de la película de aire	BTU/pie² h °F	2.45	2.44
ESPESOR DEL AISLAMIENTO	plg	0.97	1.0
Pérdida de Calor por Radiación	BTU/pie² h	4.71	4.6
Pérdida de Calor por Convección	BTU/pie² h	32.78	31.86
Pérdida de Calor Total	BTU/pie² h	37.49	36.46
Pérdida de Calor Superficie Desnuda	BTU/pie² h	611.23	611.23
Eficiencia del Aislamiento	%	93.87	94.03

11.7. Reactor catalític R-201

11.7.1. Introducció

La fluoració de tetraclorur de carboni (CCl_4) mitjançant fluorur d'hidrogen (HF) en presència de pentaclorur d'antimoni (SbCl_5) és la principal reacció per la formació dels refrigerants CCl_3F (CFC-11) i CCl_2F_2 (CFC-12).

A continuació s'especifica el disseny del reactor per la producció dels productes intermedis CCl_3F (CFC-11) i CCl_2F_2 (CFC-12); que seran el reactius per la formació del nostre producte d'interès CFC-13 (CClF_3). Les reaccions que tenen lloc a dins del reactor són les següents:



Són dues reaccions catalítiques que es donen en sèrie; primer té lloc la reacció 1 i després procedeix la reacció 2, catalitzades en presència de pentaclorur d'antimoni (SbCl_5). Totes dues reaccions són endotèrmiques i com a conseqüència s'ha d'aportar calor per tal de superar les seves energies d'activació, produint així les reaccions desitjades.

Cercant fonts bibliogràfiques, s'ha trobat un article científic que detalla amb més precisió l'estequiometria i la cinètica de les dues reaccions catalítiques en qüestió. A continuació es presenta breument l'article i la seva referència:

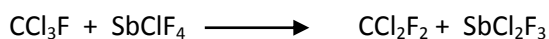
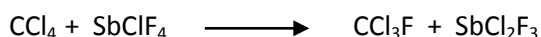
Títol : *Kinetics of tetrachloromethane fluorination by hydrogen fluoride in the presence of antimony pentachloride*

Autors : *Egbert Meissner, Eugeniusz Milchert*

Any : 2002

Font : *Elsevier Science B. V. ; Journal of Fluorine Chemistry*

Segons l'article en qüestió, el procés de fluoració del tetraclorur de carboni es pot descriure a partir de les següents reaccions:



Prèviament, el catalitzador (SbCl_5) reacciona ràpidament amb HF en excés, activant el catalitzador i donant lloc al compost SbClF_4 . Tot seguit, es donen les dues reaccions en sèrie abans presentades; en les que té lloc un intercanvi de fluorurs entre el SbClF_4 i els reactius CCl_4 i CCl_3F .

L'article també inclou dades sobre les velocitats de reacció de les dues reaccions, que es presenten a continuació:

$$r_1 = k_1 [\text{SbClF}_4] [\text{CCl}_4]$$

$$r_2 = k_2 [\text{SbClF}_4] [\text{CCl}_4]$$

Les constants cinètiques (k_1, k_2) segueixen l'equació d'Arrhenius:

$$k = k_0 e^{-E/RT}$$

Les energies d'activació de les dues reaccions són les mateixes, $E = 46 \text{ KJ/mol}$, i el factors preexponencials (k_0) són respectivament els següents:

$$k_{01} = 2.08 \cdot 10^4 \text{ L mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$k_{02} = 8.00 \cdot 10 \text{ L mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

El reactor escollit per la formació de CFC-12 seguirà el model d'un reactor de tanc agitat (RCTA) i encamisat similar al que es presenta en la següent figura:

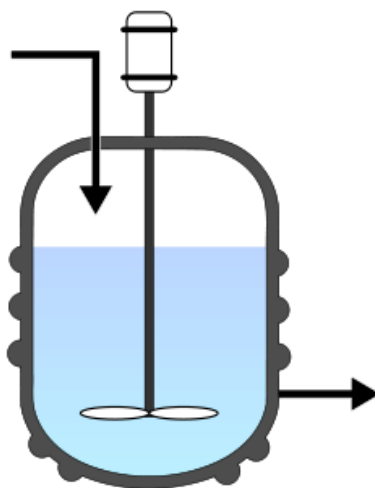


Figura 11.7.1.1. Esquema simplificat d'un RCTA similar al que s'utilitzarà en la formació de CFC-12.

S'ha decidit dur a terme les reaccions en fase líquida i utilitzar una concentració de catalitzador de $[SbCl_5] = 0,80$ a dins del reactor, en que el catalitzador es troba en la seva forma activa com a $[SbClF_4]$. Les condicions d'operació del RCTA encamiset que s'ha utilitzat es presenten a continuació:

Taula 11.7.1.1. *Condicions d'operació del reactor de formació de CFC-12.*

Temperatura de treball (°C)	90
Pressió d'operació (atm)	10

11.7.2. Balanç de matèria

A l'hora de fer el disseny del reactor, el primer pas és fer el balanç de matèria per saber els cabals d'entrada i sortida del sistema així com la seva composició, i també per comprovar que es conserva el cabal màssic.

Utilitzant el programa HYSYS, s'han obtingut els corrents d'entrada i sortida i les seves composicions que es presenten en les següents taules:

Taula 11.7.2.1. *Cabals màssics d'entrada i sortida del reactor de formació de CFC-12.*

COMPONENT	CABAL ENTRADA (Kg/h)	CABAL SORTIDA (Kg/h)
HF	1293,96	441,42
CCl ₄	3287,21	0,54
SbCl ₅	951,89	950,35
CCl ₃ F	237,43	241,71
CCl ₂ F ₂	-	2581,45
HCl	-	1556,01
TOTAL	5770,49	5771,48

S'ha comprovat que el cabal màssic es conserva, donat que els cabal d'entrada i sortida respectivament són de 57750,49 i 5771,48 Kg/h i per tant l'error només de 0,017.

Taula 11.7.2.2. Propietats dels corrents d'entrada i sortida del reactor de formació de CFC-12.

PROPIETATS DEL FLLUID	ENTRADA	SORTIDA LÍQUID	SORTIDA VAPOR
Densitat (Kg/m3)	1565	2039,44	21,52
Viscositat (cP)	0,19	0,25	0,013
Cp (KJ/Kmol·°C)	4620,14	59074,79	2152,54

Sabent el cabal màssic total que entra al reactor i la densitat de la mescla d'entrada es pot calcular el cabal volumètric d'entrada amb l'equació següent:

$$Q_v = \frac{Q_{màssic}}{\rho_{mescla}}$$

Substituint l'equació anterior per les dades proporcionades en les taules obtenim:

$$Q_v = \frac{5770,49}{1565} = 3,687 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (3687 L/h)}$$

Aquest cabal serà utilitzat més endavant pel càlcul del volum del reactor RCTA.

11.7.3. Disseny funcional

El volum del reactor catalític s'ha calculat amb les dades cinètiques que proporciona l'article científic citat a l'apartat d'introducció.

Segons les constants cinètiques de les dues reaccions s'observa que la velocitat de reacció de la reacció de formació de CFC-12 (reacció 2) és molt més lenta que la velocitat de formació de CFC-11 (reacció 1), per la qual cosa només s'ha considerat la reacció 2 pel càlcul del volum de RCTA.

L'equació per calcular el volum del nostre reactor és l'equació de disseny d'un RCTA:

$$V = \frac{F_{AE} \cdot X}{k \cdot C_{AE} \cdot C_{cat} \cdot (1-X)}$$

On:

V = volum reactor (L)

F_{AE} = cabal d'entrada CCl₄ (mol/h)

C_{AE} = concentració d'entrada de CCl₄ (mol/L), es calcula com F_{AE} / Q_v.

C_{cat} = concentració del $SbCl_5$ (mol/L)

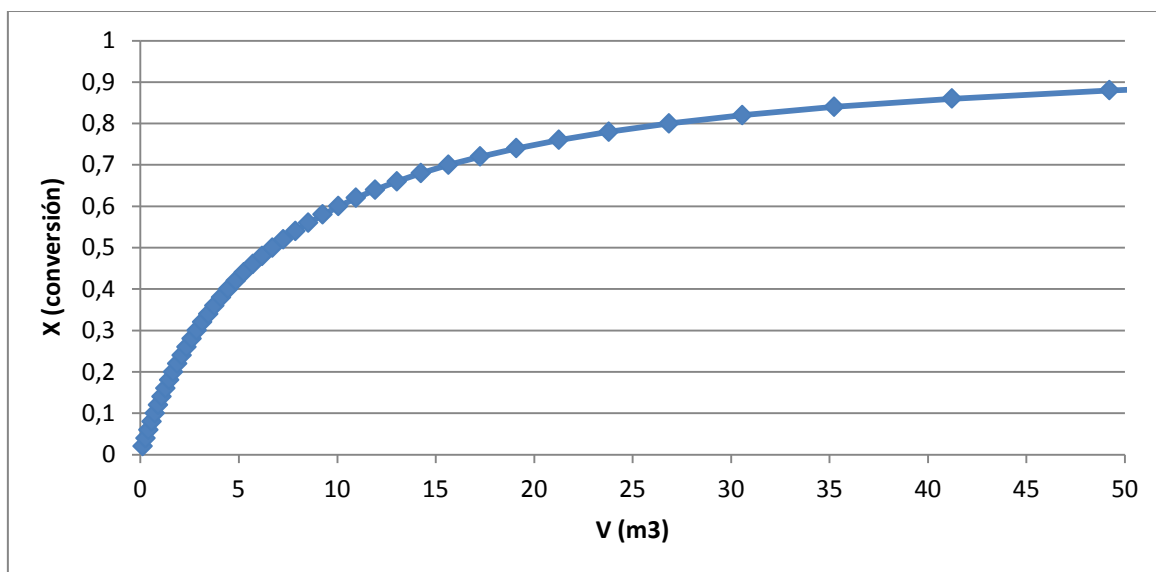
X = conversió de la reacció de formació de CFC-12

k = constant cinètica de la reacció de formació de CFC-12

Taula 11.7.3.1. Dades pel càlcul del volum de RCTA.

k (L/mol·h)	0,687
F_{AE} (mol/h)	21373,25
C_{cat} (mol/L)	0,8
Q_v (L/h)	3687
C_{AE} (mol/L)	5,797

A continuació es presenta un gràfic en que s'ha representat la variació del volum requerit en funció de conversió desitjada:



Gràfic 11.7.3.1. Volum requerit en funció de la conversió de la reacció de formació de CFC-12.

S'ha decidit treballar amb una conversió de $X = 0,78$ de la reacció de formació de CFC-12, i per tant el volum útil del RCTA per aquesta conversió és de $V_{útil} = 25 \text{ m}^3$ (25000 L).

El volum del RCTA trobat es sobredimensiona un 20 % sense tenir en compte el fons torièsfèric, de forma que el volum del reactor serà 30 m^3 .

Els reactors estaran constituïts per un cos cilíndric i un fons superior i inferior torièsfèrics. El procediment pel càlcul de les dimensions dels reactors és similar al procediment seguit en els tancs d'emmagatzematge.

A continuació es detalla el procediment pel càlcul de les dimensions del reactor de formació de CFC-12.

$$V_{\text{reactor}} = V_{\text{cilindre}} + 2 \cdot V_{\text{toriesfèric}}$$

$$V_{\text{cilindre}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{\text{cilindre}}$$

$$V_{\text{toriesfèric}} = 0.08089 \cdot D^3$$

$$H_{\text{cilindre}} = 1.5 D$$

On:

V_{reactor} = Volum del reactor (m3)

V_{cilindre} = Volum del cos cilíndric (m3)

$V_{\text{toriesfèric}}$ = Volum del cap toriesfèric (m3)

H_{cilindre} = Alçada del cos cilíndric (m)

D = Diàmetre intern del cos cilíndric (m)

L'alçada total del reactor serà la suma de l'alçada del cos cilíndric i dels fons toriesfèrics.

$$H_{\text{reactor}} = H_{\text{cilindre}} + 2 \cdot 0.169 \cdot D$$

El V_{cilindre} serà el volum sobredimensionat calculat abans; 30 m³.

Els resultats obtinguts de les equacions anteriors es mostren a continuació:

Taula 11.7.3.2. Dimensions del reactor de formació de CFC-12.

Volum cilindre (m3)	30
Alçada cilindre (m)	4,41
Alçada reactor (m)	5,41
Diàmetre (m)	2,94
Alçada caps torisfèrics (m)	0,50*2 = 1
Volum caps toriesfèrics (m3)	2,06*2 = 4,12
Volum reactor (m3)	34,12

11.7.4. Balanç d'energia

Les dues reaccions catalítiques en sèrie per la formació del CFC-11 i CFC-12 respectivament són totes dues endotèrmiques, amb la qual cosa necessiten una aportació de calor per produir-se. El balanç d'energia del reactor en determinarà l'energia necessària que s'ha de subministrar a aquest perquè les dues reaccions tinguin lloc.

Pel disseny del sistema d'escalfament del nostre reactor; com que la temperatura d'entrada al reactor és igual a la temperatura de treball d'aquest (90 °C), es considera que tan sols cal aportar la calor de reacció.

A continuació es procedeix a fer el balanç d'energia:

Es calcula el calor de reacció a la temperatura d'operació (90°C) per les dues reaccions catalítiques amb les següents expressions:

$$\Delta H_T^{90^\circ\text{C}} = \sum v_j [\Delta H - \Delta H_v]$$

On;

$$\Delta H = \sum m_j \cdot v_j \Delta H_{\text{formació}}$$

$$\Delta H_v = m_j \cdot \Delta H_{v_j}$$

- ΔH = calor de reacció a 90°C i 10 atm (KJ/h).
- $\Delta H_{\text{formació}}$ = calor de formació a 90°C i 10 atm (KJ/Kg).
- v_j = coeficient estequiomètric de component j.
- m_j = cabal màssic del component j (Kg/h).
- ΔH_{v_j} = calor de vaporització de component j que canvia de fase (KJ/Kg).

Tot seguit es presenten les taules de dades i paràmetres utilitzats pel càlcul del calor de reacció per cadascuna de les reaccions donades:

Reacció de formació de CFC-11 (reacció 1)

Taula 11.7.4.1. Calors de formació dels reactius i productes a 90 °C.

	$\Delta H_{\text{formació}}$ a 90°C (KJ/Kg)
CCl ₄	-808
HF	-14280

SbCl₅	-1958
HCl	-2489
CCl₃F	-2194

Taula 11.7.4.2. Calors de vaporització dels components que canvien de fase en la reacció 1.

	ΔH_v (KJ/Kg)
CCl₄	152,5
HF	748,6
SbCl₅	90,92

Taula 11.7.4.3. Cabals màssics dels components de la reacció 1.

Cabal entrada CCl₄ (Kg/h)	1293,96
Cabal entrada HF (Kg/h)	3287,21
Cabal entrada SbCl₅ (Kg/h)	951,89
Cabal sortida HCl (Kg/h)	1546,2
Cabal sortida CCl₃F (Kg/h)	288,74

Taula 11.7.4.4. Valors trobats de ΔH i $\Delta H_T^{90^\circ\text{C}}$.

ΔH (KJ/h)	4,35E+07
$\Delta H_T^{90^\circ\text{C}}$ (KJ/h)	6,37E+05

Reacció de formació de CFC-12 (reacció 2)

Taula 11.7.4.5. Calors de formació dels reactius i productes a 90 °C.

	$\Delta H_{\text{formació a } 90^\circ\text{C}}$ (KJ/Kg)
CCl₃F	-2194
HF	-14280
SbCl₅	-1958
HCl	-2489
CCl₂F₂	-3950

Taula 11.7.4.6. Calors de vaporització dels components que canvien de fase en la reacció 2.

	ΔH_v (KJ/Kg)
CCl₃F	375,8

HF	748,6
SbCl ₅	90,92

Taula 11.7.4.7. Cabals màssics dels components de la reacció 2.

Cabal entrada CCl ₃ F (Kg/h)	288,74
Cabal entrada HF (Kg/h)	3287,21
Cabal entrada SbCl ₅ (Kg/h)	951,89
Cabal sortida HCl (Kg/h)	1546,2
Cabal sortida CCl ₂ F ₂ (Kg/h)	2532

Taula 11.7.4.8. Valors trobats de ΔH i $\Delta H_T^{90^\circ\text{C}}$.

ΔH (KJ/h)	3,37E+07
$\Delta H_T^{90^\circ\text{C}}$ (KJ/h)	6,64E+05

El calor de reacció total serà la suma dels calors de les dues reaccions:

$$\Delta H_{90^\circ\text{C}}^0 \text{ total} = 6,37\text{E}+05 + 6,64\text{E}+05 = 1,30\text{E}+06 \text{ (KJ/h)}$$

La calor que cal aportar al reactor per tal que tinguin lloc les dues reaccions desitjades; donat que són endotèrmiques, i per mantenir la temperatura del reactor a la temperatura d'operació (90°C) es calcula com:

$$Q = \Delta H_{90^\circ\text{C}}^0 \text{ total}$$

On:

$$Q_m = \text{cabal màssic d'entrada al reactor (Kg/h)}$$

$$Q = 1,30\text{E}+06 \text{ (KJ/h)} = 361,33 \text{ Kw}$$

11.7.5. Càlcul de l'àrea de bescanvi necessària

Tal com s'ha indicat anteriorment, les dues reaccions desitjades són endotèrmiques i amb la qual cosa necessiten aportació d'energia per produir-se i mantenir la temperatura del reactor a les condicions de treball idònies.

El fluid escollit per bescanviar calor és l'oli tèrmic Dowtherm-J (les seves característiques es poden consultar en l'apartat de serveis).

Per calcular l'àrea requerida per mantenir el fluid a les condicions de treball desitjades, s'utilitzen les següents equacions tot emprant el valor de Q en KW calculat abans:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - T_R) - (T_2 - T_R)}{\ln \frac{(T_1 - T_R)}{(T_2 - T_R)}}$$

On:

- q = Calor alliberat de la reacció, kW
- U = Coeficient de transmissió tèrmic, kW/m²·°C
- A = Àrea de bescanvi necessària, m²
- ΔT_{ml} = Temperatura mitja logarítmica
- T_R = Temperatura del reactor, 90°C
- T₁ = Temperatura d'entrada de fluid tèrmic, 175°C
- T₂ = Temperatura de sortida del fluid tèrmic, 161°C

El coeficient de transmissió tèrmic (U) s'ha estimat el seu valor a partir de valors bibliogràfics trobats a la pàgina web <http://www.engineeringpage.com/technology/thermal/transfer.html>, donat que sabem el tipus de fluid que circula a dins el reactor i el que circula per la mitja canya que volem dissenyar.

L'àrea de bescanvi necessària del fluid per mantenir la temperatura del reactor a 90 °C és de **23,22 m²**.

11.7.6. Dimensionat de la mitja canya

Per fer el disseny de la mitja canya; que servirà per el bescanvi de calor requerit per mantenir la temperatura del nostre reactor a la d'operació (90°C), és necessari conèixer el cabal de fluid tèrmic per assegurar que les dimensions de la mitja canya que envolta el reactor estiguin dintre de rang.

El cabal de fluid tèrmic es calcula amb la següent expressió:

$$W = \frac{q}{C_p \cdot \Delta T_{fluid}}$$

On:

- W = Cabal màssic de fluid tèrmic, Kg/h
- q = Calor transmès per la reacció, KJ/h

- Cp = Capacitat calorífica del fluid tèrmic, KJ/(Kg·K)
- ΔT = Variació de temperatura del fluid tèrmic, K

Les propietats de l'oli tèrmic utilitzat són:

Taula 11.7.6.1. Propietats de l'oli tèrmic

T₁	175
T₂	161
Cp (KJ/Kg·K)	2,32
Densitat oli (Kg/m3)	735

El cabal màssic de fluid tèrmic obtingut ha estat de 40049 Kg/h, o el que és el mateix, **W= 11,12 Kg/s**. Si passem el cabal màssic a cabal volumètric ens dona **Q_v = 0,02 m³/s**.

El següent pas és calcular el diàmetre intern de la mitja canya; suposant un valor típic de velocitat de circulació del fluid tèrmic de 3 m/s, utilitzant les següents equacions:

$$A_{pas} = \frac{Q_v}{v}$$

$$A_{tub} = 2 \cdot A_{pas}$$

$$D_{intern\ tub} = \sqrt{\frac{A_{tub} \cdot 4}{\pi}}$$

On:

A_{pas} = Àrea de pas de l'aigua a la mitja canya (m²)

Q_v = Cabal volumètric de l'aigua (m³/s)

v = Velocitat de circulació de l'aigua (m/s)

A_{tub} = Àrea del tub (m²)

D_{intern tub} = Diàmetre intern del tub (m)

Tot seguit es calcula el diàmetre extern, suposant un gruix de 0,005 m de la mitja canya, com:

$$D_{extern\ tub} = 2 \cdot \Delta x + D_{intern\ tub}$$

On:

Δx = Gruix del tub de la mitja canya (m)

D_{intern tub} = Diàmetre intern del tub (m)

D_{extern tub} = Diàmetre extern del tub (m)

Finalment es calcula la llargada de la camisa, la longitud d'una volta, el número de voltes i la distància entre tubs a partir de les següents equacions:

$$L = \frac{A_{\text{bescanvi mitja}}}{D_{\text{extern tub}} \cdot \pi}$$

$$L_{1 \text{ volta}} = \pi \cdot D_{\text{reactor}}$$

$$N_{\text{voltes}} = \frac{L}{L_{1 \text{ volta}}}$$

$$D_{\text{ist volta}} = \frac{H_{\text{reactor}} - N_{\text{voltes}} \cdot D_{\text{extern tub}}}{N_{\text{voltes}} - 1}$$

On:

L = Longitud de la mitja canya (m)

$L_{1 \text{ volta}}$ = Longitud d'una volta al reactor (m)

D_{reactor} = Diàmetre extern del reactor (m)

N_{voltes} = Núm. De voltes de la mitja canya (m)

$D_{\text{ist volta}}$ = Distància entre voltes (m)

Els resultats obtinguts del disseny de la mitja canya es mostren a continuació:

Taula 11.7.6.2. Resultats del disseny de la mitja canya del reactor de formació de CFC-12.

U (Kw/m ² ·°C)	0,2
$A_{\text{bescanvi mitja canya}} \text{ (m}^2\text{)}$	23,22
W (Kg/s)	11,12
$Q_v \text{ (m}^3\text{/s)}$	0,02
v (m/s)	3
$A_{\text{pas}} \text{ (m}^2\text{)}$	0,005
$A_{\text{tub}} \text{ (m}^2\text{)}$	0,01
$D_{\text{intern tub}} \text{ (m)}$	0,11
Gruix (m)	0,005
$D_{\text{extern tub}} \text{ (m)}$	0,12
Llargada camisa (m)	59,93
Longitud d'una volta (m)	9,24
N voltes	6,49
Distància entre voltes (m)	0,66

11.7.7. Disseny mecànic

El disseny mecànic del reactor es realitza seguint el codi ASME per al disseny d'equips a pressió.

En primer lloc, a partir de les condicions d'operació es defineixen la pressió i la temperatura de disseny, i es decideix el material del reactor tenint en compte les característiques dels fluids que hi circulen.

- **Pressió de disseny** : la pressió de disseny es calcula segon la següent norma:

$$\text{Pressió de disseny} = \max (1,1 \cdot (P_{op} + \rho \cdot g \cdot h), (P_{op} + \rho \cdot g \cdot h) + 2 \text{ atm})$$

on:

- ρ = densitat del líquid (kg/m^3).
- g = gravetat ($9,8 \text{ m/s}^2$).
- h = alçada de líquid (m) calculada com:

$$V - V_{\text{torisfèric}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h$$

On:

- V = volum útil de reactor (m^3)
- $V_{\text{torisfèric}}$ = Volum del fons del reactor (m^3)
- D = diàmetre del reactor (m)

- **Temperatura de disseny** : la temperatura de disseny s'estableix 20 °C per sobre de la temperatura d'operació del reactor:

$$\text{Temperatura de disseny} = (T_{op} + 20 \text{ °C})$$

- **Material**: per decidir quin és el millor material per el nostre RCTA cal tenir en compte que es treballa amb el HF i el HCl, que són materials corrosius sobretot el HF que provoca elevada corrosió. Consultant la taula de la Figura 11.2.5.1 s'ha escollit el material Hastelloy B-2 amb una corrosió menor de 0,508 mm/any. El material Hastelloy B-2 és un aliatge en base a níquel-molibdè amb una excel·lent resistència al HCl a qualsevol temperatura i concentració. També és resistent al HF, àcid sulfúric, àcid acètic entre d'altres.

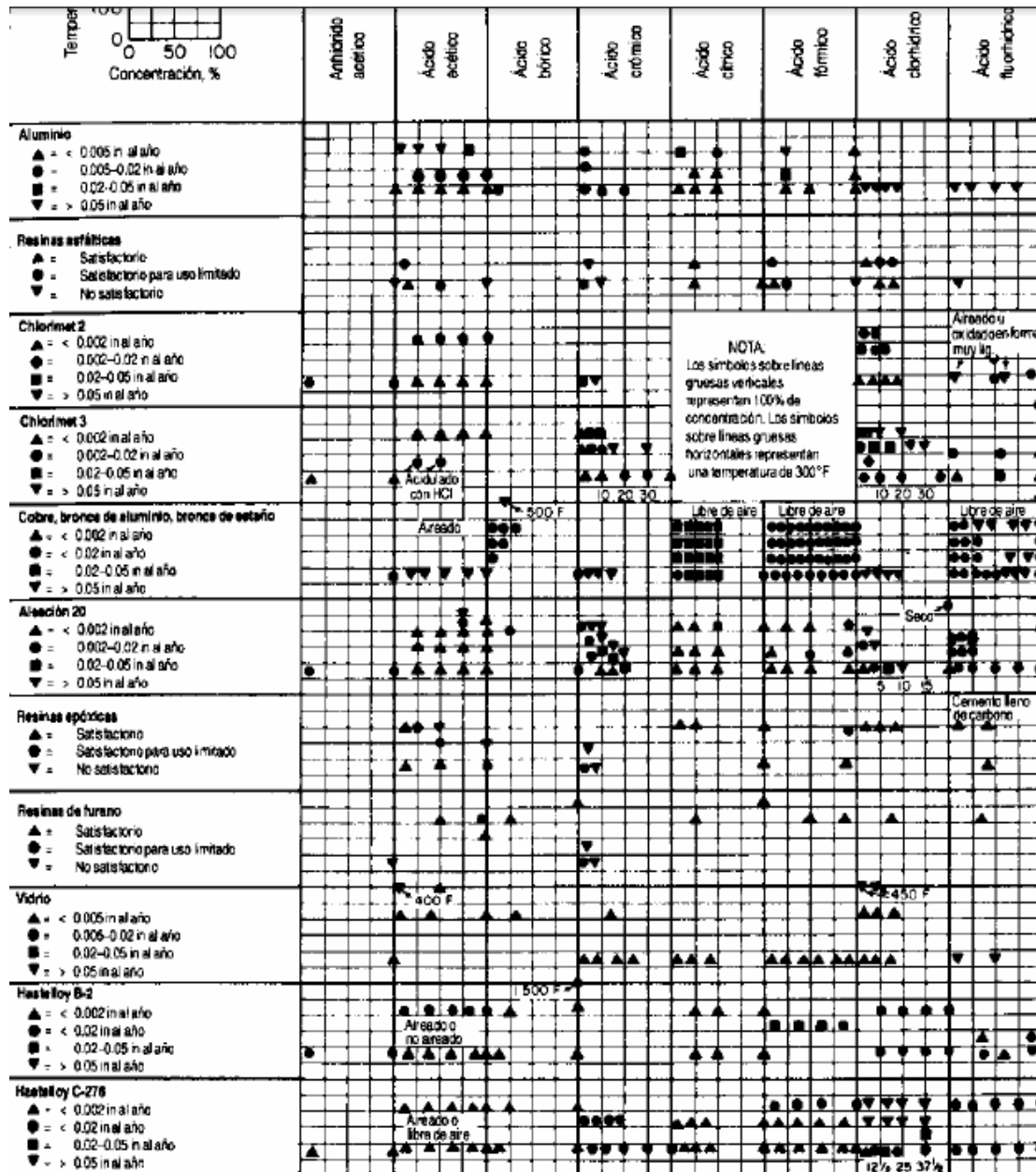


Figura 11.7.7.1. Dades de corrosió per diferents materials de construcció (Perrys Handbook).

Un cop definides les condicions de disseny, es procedeix al disseny aplicant la normativa ASME:

Espessor del cilindre. Càlcul a pressió interna: L'espessor del cos cilíndric es calcula amb l'expressió següent:

$$t_c = \frac{P \cdot R_{int}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C.A$$

on:

- t_c = espessor del cilindre (mm)

- P = pressió de disseny del recipient (bar)
- R_{int} = radi intern (mm)
- E = factor de soldadura = 0,85 (radiografiat doble parcial)
- S = carrega admissible del material (bar) = 7583,40 bar
- C.A = sobreessessor (mm)

El sobre essessor per corrosió del material es de 0,508 mm/any com a màxim, suposant que la vida útil del reactor seran 10 anys el sobreessessor serà 5,08 mm.

El valor de t_c obtingut es sobredimensiona un 10% i per tal d'evitar costos de fabricació específics.

$$t_{carcassa} = t_c + 0.1 \cdot t_c$$

Espessor dels capçals. Càlcul a pressió interna: el tipus de capçal utilitzat és el toriesfèric ja que és el més comú en la indústria química.

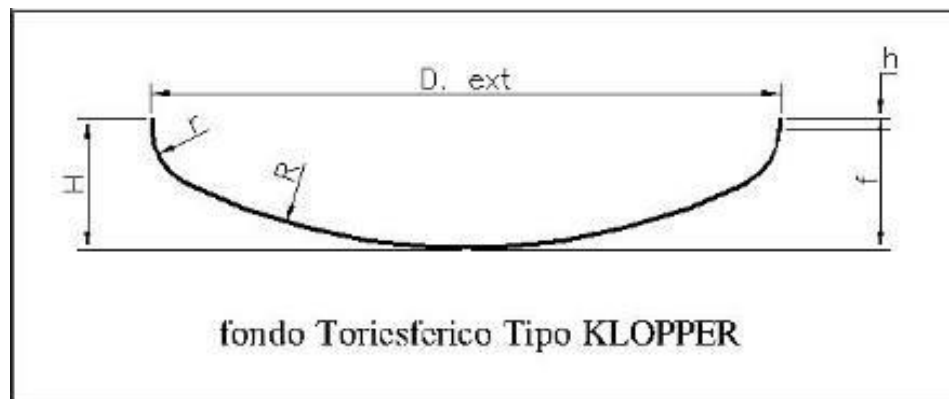


Figura 11.7.7.2. Esquema de les dimensions d'un capçal tipus toriesfèric.

L'espessor del capçal es calcula com:

$$t_f = \frac{P \cdot R \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} + C_1 + C_2$$

on:

- t_f = espessor del capçal (mm)
- P = pressió de disseny del recipient (bar)
- M = factor que depèn de la relació R/r , en aquest cas igual a 1,54
- E = factor de soldadura = 0,85 (radiografiat doble parcial)

- S = carrega admissible del material (bar) = 7583,40 bar
- C1 = marge per corrosió (mm) = 7,62
- C2 = tolerància de fabricació (mm) = 10% de l'espessor.

Alçada de l'equip: a continuació es definiran les dimensions relacionades amb l'alçada dels capçals: H, h i f i es calcularà l'alçada real de l'equip.

$$h = 3,5 \cdot t_f$$

$$f = 0,1955 \cdot D_{ext} - 0,455 \cdot t_f$$

$$H = h + f$$

$$\text{Alçada total equip} = \text{Alçada cos} + 2 \cdot H$$

Volum intern de l'equip: el volum intern de l'equip té en compte el volum de la carcassa i el volum dels capçals calculats amb les fórmules següents:

$$V_{carcassa} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int}^2 \cdot L$$

$$V_{fons} = \frac{\pi}{8} \cdot 0,162 \cdot D_{int}^3$$

on:

- D_{int} = diàmetre intern de la carcassa (m)

- L = longitud del cilindre (m)

$$V_{intern} = C_{carcassa} + 2 \cdot V_{fons}$$

Pes de l'equip buit: el càlcul es realitza tenint en compte la densitat del material i el volum de la paret de l'equip calculat com la diferència entre el volum intern i l'extern, per tal de fer-ne les proves d'estanqueïtat.

$$C_{carcassa\ extern} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{ext}^2 \cdot L$$

$$V_{fons\ extern} = \frac{\pi}{8} \cdot 0,162 \cdot D_{ext}^3$$

$$V_{extern} = C_{carcassa\ extern} + 2 \cdot V_{fons\ extern}$$

$$\text{Volum material} = V_{extern} - V_{intern}$$

$$\text{Pes equip buit} = \rho_{\text{hastelloyB2}} \cdot \text{Volum material}$$

On:

$$\rho_{\text{hastelloyB2}} = 9220 \text{ Kg/m}^3$$

Es considera un 10% més de material per la carcassa per tal de tenir en compte soldadures, cargols, brides i similar, essent el pes final de l'equip buit:

$$\text{Pes total equip buit} = \text{Pes equip buit} + 0.10 \cdot \text{Pes equip buit}$$

Pes de l'equip amb aigua: El pes de l'equip en condicions de prova es calcula com:

$$\text{Pes amb aigua} = \text{Pes total equip buit} + 10^3 \cdot V_{\text{reactor}}$$

Pes del reactor en operació: es té en compte el pes de l'equip buit i el pes de líquid que conté.

$$\text{Pes en operació} = \text{Pes buit} + \rho_{\text{liquid}} \cdot V_{\text{liquid}}$$

A continuació es presenta un resum del disseny mecànic del RCTA:

Taula 11.7.7.1. Disseny mecànic del reactor de formació de CFC-12.

Material	Hastelloy B-2
Pressió de disseny (atm)	12,46
Temperatura disseny (°C)	110,00
Diàmetre extern (m)	2,95
Diàmetre intern (m)	2,94
Alçada cos (m)	4,41
Alçada capçals (m)	1,22
Alçada total (m)	5,63
Volum equip (m³)	33,24
Espessor paret (mm)	8,72
Espessor capçals (mm)	10,60
Pes equip buit (Kg)	1908,29
Pes amb aigua (Kg)	36218,81
Pes en operació (Kg)	37208,10

11.7.8. Disseny de l'agitador

Per tal d'aconseguir una bona transferència de matèria i calor en el nostre reactor i mantenir el seu contingut homogeneïtzat, s'incorpora un sistema d'agitació.

Els tipus principals d'agitadors utilitzats en la indústria són, d'hèlix, de paletes i de Turbina. En el cas del reactor de formació de CFC-12 es decideix utilitzar un agitador d'hèlix de tres fulles.

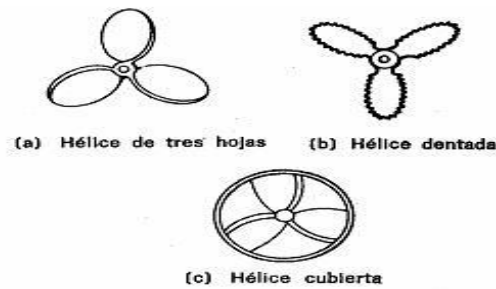


Figura 11.7.8.1. Tipus d'agitador hèlixs.

Aquests agitadors produeixen un flux axial que opera a una velocitat elevada i és adequat per a líquids poc viscosos com el de la nostra mescla de reacció ($\mu = 0,19$ cP). Els agitadors d'hèlix són eficaços per tancs de grans dimensions com el nostre reactor.

Un cop escollit el tipus d'agitador es calculen les seves dimensions tenint en compte les relacions geomètriques de la figura 11.7.8.2 :

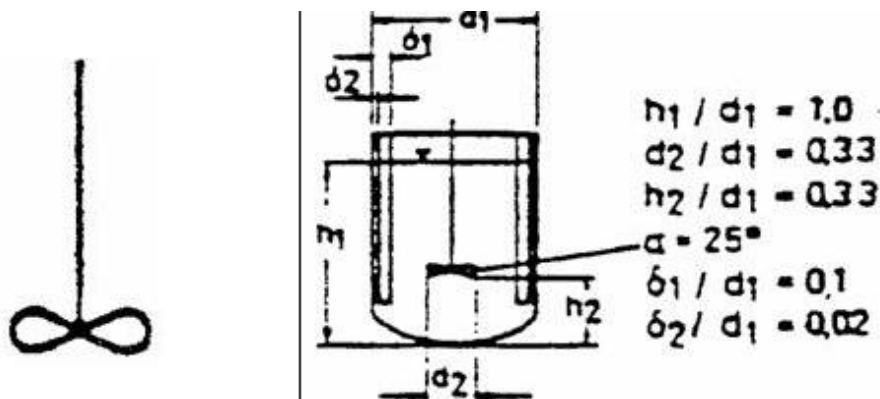


Figura 11.7.8.2. Relacions geomètriques d'un agitador d'hèlix.

Relacions geomètriques:

$$h_1/d_1 = 1,0$$

$$d_2/d_1 = 0,33$$

$$h_2/d_1 = 0,33$$

$$\delta_1/d_1 = 0,1$$

$$\delta_2/d_1 = 0,2$$

On:

- h1 = alçada de líquid (m).
- d1 = diàmetre intern del reactor (m).
- d2 = diàmetre de l'agitador (m).
- h2 = alçada des de la hèlix fins el fons del reactor (m).
- δ1 = amplada de les pales deflectores (m).
- δ2 = distancia entre la paret del reactor i la placa deflectora (m).

Taula 11.7.8.1. Dimensions de l'agitador.

Agitador	hèlix
d2 (m)	0,97
h2 (m)	0,97
δ1 (m)	0,29
δ2 (m)	0,59

Es col·loquen 4 plaques deflectores, valor estàndard, per evitar la formació de remolins en el reactor.

La potència que tindrà l'agitador es pot calcular a partir del Reynolds d'agitació amb l'equació següent:

$$Re = \frac{\rho \cdot N \cdot Da^2}{\mu}$$

On:

- ρ = densitat de la mescla (kg/m³)
- N = revolucions de l'agitador (rps)
- Da = diàmetre de l'agitador
- μ = viscositat de la mescla

Amb el Reynolds es pot conèixer el valor del numero de potencia (Np) que permetrà saber quina potencia requereix l'agitador del reactor. Per valors de Reynolds superiors a 10.000 Np agafa un valor constant. Consultant la figura 11.7.8.3 tenim que Np es igual a 0,4.

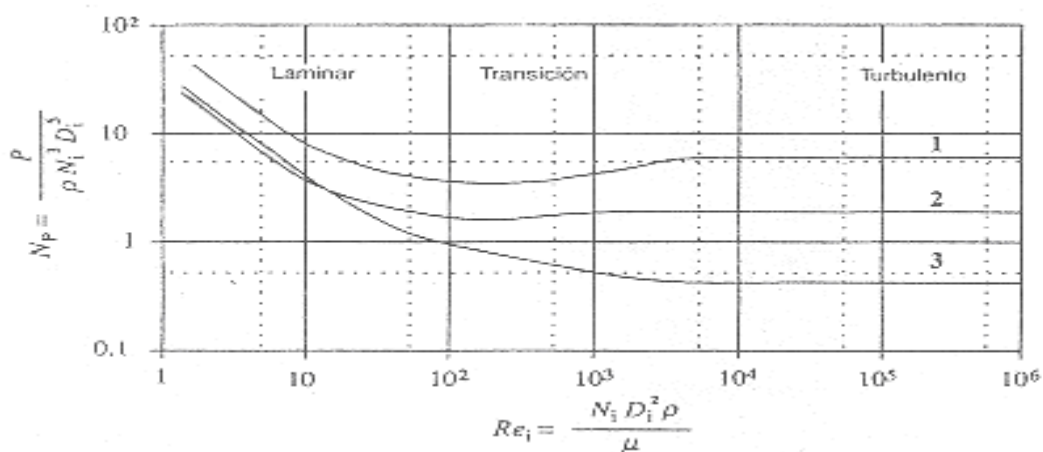


Figura 11.7.8.3. Relació nombre de Reynolds nombre N_p . Línea 3 corresponent a agitador d'hèlix.

La potència de l'agitador serà doncs:

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot Da^5$$

Es considera que l'agitador té un rendiment del 65%, per la qual cosa, la potència obtinguda haurà de dividir-se entre 0,65.

Els resultats obtinguts són:

Taula 11.7.8.2. Dimensions de l'agitador.

Re	11595672,6
densitat mescla (Kg/m3)	1404,36
N (rps)	1,67
n (rpm)	100,00
Da (m)	0,97
viscositat mescla (Kg/m·s)	1,90E-04
N_p	0,40
P (W)	2235,58
P (KW)	2,24
P real (KW)	3,44

11.7.9. Aïllament del reactor

Segons la normativa ASME, es necessari l'aïllament dels equips dissenyats quan la seva temperatura d'operació és superior als 60 °C, així s'eviten possibles accidents com per exemple que el operaris no es cremin. L'aïllament també serveix per a que no hi hagin pèrdues de calor amb l'exterior del reactor i la seva temperatura és mantingui a la temperatura d'operació (90 °C).

Com que la temperatura de carcassa en el nostre reactor oscil·larà entre els 90 °C, caldrà posar algun tipus d'aïllament.

S'ha decidit utilitzar com a material aïllant llana de roca. Pel càlcul del gruix d'aïllant s'utilitza el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL.

El gruix d'aïllant necessari segons el programa Insulan és de 0,5 polsades, és a dir; 1,27 cm de gruix.

Les dades necessàries per obtenir aquest gruix es presenten a continuació:

Taula 11.7.9.1. Càlcul del gruix de l'aïllant.

Temperatura ambient (°C)	21
Temperatura exterior d'aïllament (°C)	36
Velocitat de l'aire (m/s)	20
densitat llana de roca (Kg/m3)	100
Gruix de l'aïllant (cm)	1,27

11.7.10. Disseny del disc de ruptura

Els discos de ruptura són dispositius utilitzats per la protecció d'equips, com poden ser tancs o reactors, d'un possible efecte catastròfic a causa d'una sobrepressió.

El càlcul de l'àrea necessària del dispositiu de protecció del nostre reactor per alleugeriment de pressió mitjançant la descàrrega de fluid, es realitzarà en base a la Guia de bones pràctiques NTP 457.

Segons la NTP 457, i per a fluids compressibles (gasos i vapors); la fórmula per calcular l'àrea del disc de ruptura del reactor és la següent:

$$A_o = \frac{q_m}{C \cdot \alpha \cdot P} \cdot \sqrt{\frac{T \cdot Z}{M}}$$

On:

A_o = àrea del disc de ruptura (mm^2)

q_m = cabal màssic a descarregar (kg/h)

T = temperatura absoluta de alleugeriment (K)

Z = factor de compressibilitat

M = massa molecular (kg/kmol)

P = pressió de alleugeriment (bar)

α = coeficient de descàrrega

C = constant que depèn del coeficient isentròpic k (c_p/c_v)

Els coeficients de descàrrega en els discos de ruptura per gasos/vapors són:

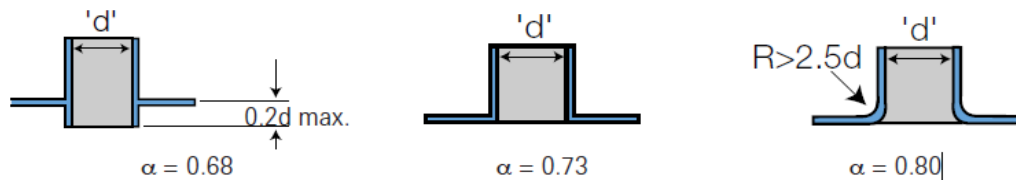


Figura 11.7.10.1. Coeficients de descàrrega per diferents configuracions.

Un cop calculada l'àrea del disc de ruptura, es pot calcular el seu diàmetre amb la següent equació:

$$D = \sqrt{\frac{A_o \cdot 4}{\pi}}$$

On:

D = diàmetre del disc de ruptura (mm^2)

A continuació es presenten els resultats del disseny del disc de ruptura del reactor de CFC-12, considerant que el coeficient de descàrrega és 0,73 i per tant tindrà la forma que indica la figura 11.7.10.1.

Taula 11.7.10.1. Disseny del disc de ruptura del reactor de formació de CFC-12

q (Kg/h)	5186,51
C	2,4
α	0,68
P (bar)	13
T (K)	383

M (Kg/Kmol)	59,19
Z	1
A₀ (mm²)	790,92
D (mm)	31,73

11.7.11. Catalitzador

El catalitzador que s'ha utilitzat per produir les reaccions que es donen en el RCTA dissenyat és el pentaclorur d'antimoni (SbCl₅). És una substància molt corrosiva i que s'usa generalment com a catalitzador en la cloració de compostos orgànics.

Per la manca de dades sobre el catalitzador i més concretament sobre el seu temps de vida, s'ha suposat que aquest últim és d'un any.

No obstant això, per controlar una possible desactivació o pèrdua de la concentració del catalitzador, s'ha decidit mesurar la concentració del catalitzador diàriament mitjançant un equip d'absorció atòmica (AA). Aquest mètode instrumental ens permetrà saber si la concentració del catalitzador al reactor és la desitjada (0,80 M) i també ens donarà informació sobre la desactivació d'aquest.



Figura 11.7.11.1. Equip d'absorció atòmica.

Per agafar mostres del reactor per el seu anàlisi s'utilitzarà un dispositiu de presa de mostres tipus PV. És un aparell que permet extreure una mostra representativa d'un reactor sota les condicions de procés sense la necessitat de detenir el procés ni obrir el reactor, i on la mostra es retornarà sense cap contaminació.

Taula 11.7.11.1. Dades tècniques del dispositiu de presa de mostra tipus PV.

Presión (bar)	10
Temperatura (°C)	200
Volum de mostra (mL)	150/250/500/1000

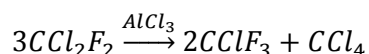
A més la unitat PV de presa de mostres de reactor pot anar dotada de diversos dispositius detectors per mesurar el Redox, pH o la temperatura del procés a l'interior del reactor.



Figura 11.7.11.2. Dispositiu presa de mostra tipus PV.

11.8. Reactor flux pistó R-401

En aquest apartat, es descriu el procediment de càlcul seguit en el disseny del reactor catalític de flux pistó R-501, on s'obté refrigerant 13 i tetraclorur de carboni a partir de refrigerant 12 mitjançant l'acció catalítica de triclorur d'alumini sòlid:



El reactiu entra en fase gas, no es dona cap canvi de fase amb la reacció, així doncs, els productes s'obtenen també en fase gasosa; d'altra banda, el catalitzador és sòlid. El fluid refrigerant que s'emprarà és l'oli tèrmic "DOWTHERM J", el qual es trobarà en fase líquida en el rang de temperatures a les que s'operarà. Per tant, el reactor serà multifàsic.

Donat que la reacció que es dona és exotèrmica, el reactor haurà de tenir un sistema de refrigeració per tal d'operar isotèrmicament. Si el diàmetre del tub és molt gran, es poden donar gradients de temperatura en sentit radial, així doncs, es dissenyarà un reactor de flux pistó multitubular com el que es mostra a continuació:

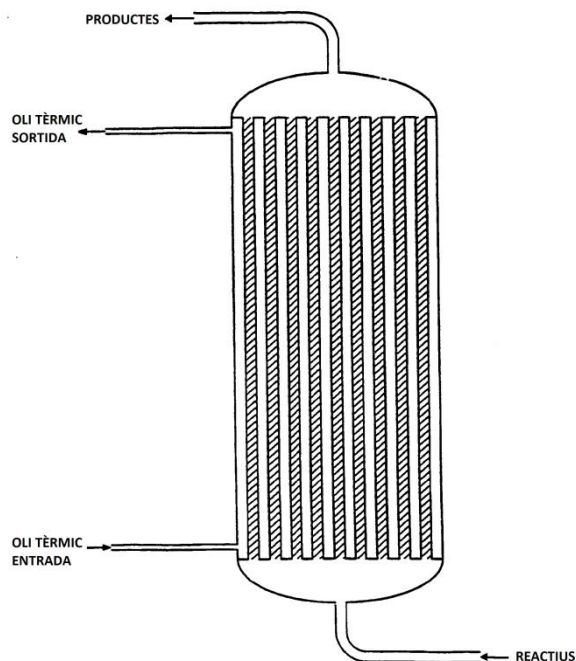


Figura 11.8.1: Reactor multitubular de flux pistó.

Donat que el reactiu es troba a temperatures més elevades, aquest circularà per dins dels tubs, on també estarà allotjat el catalitzador.

No s'ha pogut trobar dades cinètiques per a la reacció que es duu a terme; pel disseny del reactor, s'han emprat les dades de l'exemple 1 de la patent "Process of preparing CClF_3 " i s'ha operat del mateix mode i en les mateixes condicions:

Taula 11.8.1: Valors especificats per la patent de l'experiment 1.

	R-12	R-13	CCl_4
Entrada (g)	22,4	-	-
Sortida (g)	2,4	11,1	8,8
Pes molecular (g/mol)	121	104,4	153,8
Valors de la reacció			
Pressió (mmHg)	770		
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	126-130		
Relació g R-12/g catalitzador/h	0,35		
Conversió	0,89		
Rendiment producte teòric	0,96		
Catalitzador	AlCl_3 comercial 5-20 mesh		

11.8.1. Balanç de matèria

Primerament, es va realitzar una aproximació del cabal necessari d'entrada de refrigerant 12 al reactor per tal d'arribar a l'objectiu de producció. Prenent una conversió del 89%:

$$10000 \frac{\text{tones}}{\text{any}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tona}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{300 \text{ dies}} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}} = 1388,9 \text{ kg/h R-13}$$

$$n_{\text{sortida},i} = n_{\text{entrada},i} - \frac{\nu_i}{\nu_A} \cdot n_{\text{entrada},A} \cdot X$$

On:

$n_{\text{sortida},i}$ és el cabal molar a la sortida del component "i" (kmol/h)

$n_{\text{entrada},A}$ és el cabal molar a l'entrada del reactiu (kmol/h)

ν_i és el coeficient estequiomètric del component "i"

ν_A és el coeficient estequiomètric del reactiu

X és la conversió

$$\text{cabal R-13 sortida} = \text{cabal R-13 entrada} + \text{R-13 format}$$

$$1388,9 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0 + \frac{2}{3} \cdot \text{cabal entrada R-12} \cdot 0,89 \rightarrow \text{cabal entrada R-12} = 2340,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Tenint en compte que l'eficàcia del procés pot disminuir i que hi ha un rendiment respecte el producte que s'obté teòricament, s'introdueix més cabal del necessari per tal de tenir un marge de producció de refrigerant 13. També, s'ha de contemplar que el refrigerant 12 que ha quedat sense reaccionar en el procés es recircula al reactor.

Es comproven els valors obtinguts amb HYSYS mitjançant el balanç de matèria, obtenint els següents valors dels corrents d'entrada i sortida:

Taula 11.8.2: Valors dels corrents d'entrada i sortida del reactor

	Entrada	Recirculació	Sortida teòrica	Sortida hysys
R-12 (kmol/h)	21,35	2,37	2,61	2,37
R-13 (kmol/h)	0,00	0,00	14,08	14,23
CCl₄ (kmol/h)	0,00	0,08	7,12	7,2

Pels corrents obtinguts, s'obtenen els següents valors i propietats d'entrada i sortida, tots dos en fase gas:

Taula 11.8.3: Especificacions del corrent d'entrada i sortida al reactor.

	Q (kg/h)	Densitat (kg/m ³)	Viscositat (kg/ms)
Entrada	2870,7		
Sortida	2872,8		

11.8.2. Desactivació del catalitzador

Abans de dissenyar el reactor, és necessari estimar la vida del catalitzador, ja que determinarà la durada del procés, degut a les parades que s'hauran de fer per canviar-lo o regenerar-lo.

Sabent que l'experiment de l'exemple té una durada de 439 hores i que la desactivació que s'ha donat en el transcurs d'aquest temps és del 0,34% en pes (es calcula la desactivació que es donarà al llarg d'un any, per tal de determinar si és possible operar tot l'any amb el mateix catalitzador:

$$\frac{0,34 \text{ g AlF}_3}{\text{g catalitzador} \cdot 439 \text{ h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} \cdot \frac{300 \text{ dies}}{1 \text{ any}} = 5,576\% \text{ desactivat}$$

Veient la baixa desactivació que es dona, es pot considerar que es pot treballar l'any sencer amb el mateix catalitzador, podent augmentar la llargada del llit per tal de que el rendiment de la reacció no disminueixi.

11.8.3. Determinació del volum del reactor

Per tal d'assolir la mateixa conversió que a l'exemple 1 de la patent, les condicions de treball del reactor hauran de ser les mateixes que les de l'exemple, així com el tipus de catalitzador i la proporció de quantitat de triclorur d'alumini respecte refrigerant 12. Per AlCl₃ comercial, amb una mida de partícula de 10 mesh s'han trobat les següents especificacions:

Taula 11.8.4: Dades del catalitzador AlCl₃.

Dp (m)	ρ_{aparent} (g/mL)	ρ_{AlCl_3} (g/mL)
0,002	1,1	2,48

Primer, es comença calculant la porositat, utilitzant la densitat aparent i la densitat real del triclorur d'alumini:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{aparent}}}{\rho_{\text{AlCl}_3}}$$

On:

ρ_{AlCl_3} és la densitat real del triclorur d'alumini (g/mL)

ε és la fracció d'espai lliure respecte el volum total

$\rho_{aparent}$ és la massa de $AlCl_3$ que hi haurà per volum total (g/mL)

$$\varepsilon = 1 - \frac{1,1 \text{ g/mL}}{2,48 \text{ g/mL}} = 0,56$$

A continuació, es calcula la quantitat necessària de catalitzador per tal d'assolir la conversió desitjada en funció del cabal d'entrada de R-12 al reactor:

$$m_{catalitzador} = 2881,64 \frac{\text{kg R-12}}{h} \cdot \frac{1 \text{ kg catalitzador} \cdot h}{0,35 \text{ kg R-12}} = 8233,26 \text{ kg catalitzador}$$

Es calcula el volum total de reactor per albergar tota la quantitat de catalitzador necessària:

$$V = \frac{m_{catalitzador}}{\rho_{AlCl_3} \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{8233,26 \text{ kg } AlCl_3}{2,48 \frac{\text{kg } AlCl_3}{L} \cdot (1 - 0,556) \frac{L}{L_{total}}} = 7485 \text{ L}$$

Per motius de seguretat, es sobredimensiona un 20% el reactor:

$$V_{reactor} = 1,2 \cdot V = 1,2 \cdot 7485 \text{ L} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 9 \text{ m}^3$$

11.8.4. Càlcul del número de tubs

Primerament, es decideix el diàmetre exterior dels tubs, per tal de determinar posteriorment el número de tubs necessaris. Tenint en compte l'apèndix 7 de Mc Cabe, "datos sobre tubos de condensadores y cambiadores de calor", s'observa que el diàmetre màxim que es pot seleccionar per a una correcta transmissió de calor és dues polzades. Donat que dins els tubs tenim catalitzador, per tal de facilitar el recanvi d'aquest o la neteja de l'equip, es pren dues polzades com a diàmetre exterior. Les característiques dels tubs seran les següents:

Taula 11.8.5: Valors de les dimensions dels tubs.

D_E (m)	Δx (m)	D_I (m)
0,0508	0,00277	0,04526

També serà necessari decidir una llargada dels tubs; es pren 6m, als quals se'ls hi ha de restar 2,5 cm per cada banda, per tal de realitzar la connexió amb els capçals:

$$L = 6 - 2 \cdot 0,025 = 5,95m$$

Amb la llargada i el diàmetre intern, es calcula el volum interior de cada tub:

$$V_{tub} = \pi \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \cdot L = \pi \cdot \left(\frac{0,04526\text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 5,95\text{ m} = 0,00957\text{ m}^3$$

Relacionant el volum de cada tub amb el volum total, es pot saber el número de tubs que es necessitaran per arribar als 9 m³:

$$N_t \cdot V_{tub} = V_{reactor} \rightarrow N_t = \frac{9\text{ m}^3}{0,00957\text{ m}^3} = 938,3\text{ tubs}$$

S'arrodoneix el número de tubs a l'alça, per tant, es tindran 939 tubs.

11.8.5. Balanç d'energia

Al treballar amb un reactor de flux pistó a nivell industrial, on els cabals d'entrada de reactius són considerables, i per tant, la secció de pas també ho és, es donen problemes per que no es donin gradients de temperatura en sentit radial; ja que al haver-hi un diàmetre gran de reactor, el fluid que es troba a tocar les parets, cedeix molt més calor que el que circula pel centre de la conducció.

Per tant, per evitar aquest inconvenient, es divideix el volum del reactor en diferents tubs, per tal de reduir el diàmetre, i d'aquesta manera, augmentar l'àrea de transferència de calor. És a dir, s'operarà amb un reactor de flux pistó multitubular, el qual es dissenyarà d'una manera força aproximada a un bescanviador de calor de carcassa i tubs mitjançant el mètode Kern.

11.8.5.1. Calor a intercanviar i cabal necessari de fluid refrigerant

Al donar-se una reacció exotèrmica, primerament, s'ha de calcular el calor que es despendrà al formar-se el producte, per tal de dissipar-lo i evitar un augment de la temperatura, ja que l'objectiu d'operació és treballar a la mateixa temperatura dins de tot el reactor, és a dir de manera isoterma.

$$Q_{reacció} = \Delta H_r \cdot X \cdot n$$

On:

$Q_{reacció}$ és el calor generat en la reacció (kJ/h)

ΔH_r és l'entalpia de la reacció (kJ/kmol)

X és la conversió global de la reacció

n és el cabal molar (kmol/h)

Prèviament, però, s'ha de calcular l'entalpia de la reacció a la temperatura de treball del reactor, emprant les següents equacions:

$$\Delta H_f(T) = \Delta H_f(T_r) + \int_{T_r}^T c_{p_i} \cdot dT$$

$$\Delta H_r = \sum \nu_i \cdot \Delta H_f$$

On:

ΔH_f és la entalpia de formació de cada component (kJ/kmol)

T és la temperatura d'operació (398K)

T_r és la temperatura de referència (298K)

c_{p_i} és el calor específic mitjà de cada component pel llindar de temperatures (kJ/kmolK)

ν_i és el coeficient estequiomètric de cada component

Per fer-ho, seran necessàries les següents dades bibliogràfiques:

Taula 11.8.6: Coeficients del calor específic per a gasos ideals i entalpia de formació estàndard dels components.

	CpA	CpB	CpC	CpD	CpE	CpF	ΔH_f a 25°C (kcal/kmol)
CCl₄	3,1045	0,1	-0,00019644	1,9939E-07	-1,0108E-10	2,0184E-14	-22940
R-12	5,449	0,04565	-0,00003765	1,065E-08	0	0	-166000
R-13	3,0476	0,077921	-0,00012746	1,1345E-07	-5,221E-11	9,6972E-15	-115000

Les quals s'empraran en el càlcul del calor específic de cada component per a una temperatura determinada:

$$c_p = c_{pA} + c_{pB} \cdot T + c_{pC} \cdot T^2 + c_{pD} \cdot T^3 + c_{pE} \cdot T^4 + c_{pF} \cdot T^5 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol K}} \right)$$

Obtenint els següents valors:

Taula 11.8.7: Calor específic i entalpia de formació al rang de temperatures de treball.

	ΔH_f a 25°C (kJ/kmol)	C_p a 25°C (kJ/kmolK)	C_p a 125°C (kJ/kmolK)	$C_{p\text{mitja}}$ (kJ/kmolK)	ΔH_f a 125°C (kJ/kmol)
R-12	-480700	66,95	76,72	71,84	-473516
R-13	-693880	73,53	82,94	78,23	-686056
CCl₄	-95889,2	83,68	92,21	87,94	-87094

Fent el sumatori dels calors de reacció multiplicats pels seus respectius coeficients estequiomètrics, s'obté:

$$\Delta H_r = -38659,3 \text{ kJ/kmol}$$

S'aplica el valor obtingut en l'equació de càlcul del calor de reacció:

$$Q_{reacció} = -38659,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \cdot 23,7 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \cdot 0,89 = -815379,6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Donat que el reactiu entra a la temperatura desitjada d'operació, ja que s'escalfa prèviament, i no es vol que la temperatura variï, el calor a eliminar serà igual al generat per la reacció:

$$Q_{reacció} = Q_{cedit} = -815379,6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = -226,5 \text{ kW}$$

El fluid refrigerant haurà d'absorbir tot el calor que s'hagi generat en la reacció per tal que la temperatura no augmenti; per tant, el calor que haurà d'aportar serà el cedit, però canviat de signe. S'ha descartat l'aigua com a fluid refrigerant, degut a que aquesta reacciona violentament amb el triclorur d'alumini i pensant en possibles fuites podria suposar un risc. Així doncs, s'ha escollit l'oli tèrmic que prové de la torre de refrigeració com a fluid refrigerant:

$$Q_{oli \text{ refrigerant}} = m_{oli} \cdot C_{Pol} \cdot (T_{S,oli} - T_{E,oli})$$

On:

$Q_{oli \text{ refrigerant}}$ és el calor que ha d'absorbir l'oli (kJ/h)

m_{oli} és el cabal d'oli (kg/h)

C_{Pol} és el calor específic mitjà de l'oli pel llindar de temperatures (kJ/kg°C)

$T_{S,oli}$ és la temperatura de sortida de l'oli (°C)

$T_{E,oli}$ és la temperatura d'entrada de l'oli (°C)

$$m_{oli} = \frac{815379,6 \text{ kJ/h}}{1,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (39,78 - 29)^\circ\text{C}} = 40000 \text{ kg/h}$$

11.8.5.2. Àrea de transferència i nº de tubs

Per calcular l'àrea necessària de transferència de calor, primer, s'ha de determinar l'increment de temperatura mitjà logarítmic, tot tenint en compte el tipus de circulació.

Com que al principi del reactor és quan més conversió de reactiu a producte hi haurà, i per tant, més calor es produirà, s'opta per una circulació en paral·lel, és a dir, tant l'oli tèrmic com el reactiu entren per la part inferior del reactor:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

On:

$$\Delta T_1 = T_{E,mescla} - T_{E,oli} (^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta T_2 = T_{S,mescla} - T_{S,oli} (^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(125 - 39,78) - (125 - 29)}{\ln\left(\frac{(125 - 39,78)}{(125 - 29)}\right)} = 90,5 ^{\circ}\text{C}$$

També serà necessari suposar un valor pel coeficient global de transmissió de calor (U). Per determinar-ho, es té en compte que el fluid refrigerant és un oli i que l'altre fluid es troba en fase gas a pressió atmosfèrica. Sabent valors típics per a sistemes de refrigeració on intervien aquests fluids, es pren $20\text{W/m}^2\text{^{\circ}C}$ com a valor mitjà del gas, que equival a $72\text{kJ/hm}^2\text{^{\circ}C}$:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

$$A = \frac{815379,6\text{ kJ/h}}{72 \frac{\text{kJ}}{\text{hm}^2\text{^{\circ}C}} \cdot 90,5 ^{\circ}\text{C}} = 125,1\text{ m}^2$$

D'altra banda, l'àrea de transmissió de calor de cada tub per les mides escollides anteriorment per aquests serà:

$$A_{ext,tub} = \pi \cdot D_E \cdot L = \pi \cdot 0,0508\text{ m} \cdot 5,95\text{ m} = 0,95\text{ m}^2$$

Dividint l'àrea total necessària entre la de cada tub, s'obté el número de tubs necessaris de les dimensions especificades per a una correcta transmissió de calor:

$$n^{\circ}_{tubs} = \frac{A}{A_{ext,tub}} = \frac{125,1\text{ m}^2}{0,95\text{ m}^2} = 131,8\text{ tubs} \approx 132\text{ tubs}$$

Comparant el valor obtingut de número de tubs necessaris per arribar al volum del reactor amb els que es necessiten per assolir una bona transmissió de calor, s'observa, com no es donarà cap limitació en la transferència d'energia, ja que l'àrea exterior de transferència de calor serà molt més gran a la necessària.

11.8.6. Dimensions geomètriques i comprovació del règim de circulació

S'escull una disposició de tubs triangular, el que determinarà el pitch, número que marca la distància entre els centres de dos tubs consecutius. Per a una disposició triangular, es recomana 1,25 vegades el diàmetre exterior dels tubs:

$$pitch = 1,25 \cdot D_E = 1,25 \cdot 50,8 \text{ mm} = 63,5 \text{ mm}$$

Amb la disposició dels tubs i el número de passos per tubs, el qual és 1, es determina el valor de les constants n i k , per tal de calcular així, el diàmetre del feix de tubs:

$$D_b = D_E \left(\frac{N_t}{k_1} \right)^{1/n_1}$$

On:

$$\text{Per pitch triangular i un pas per tub} \begin{cases} n_1 = 2,142 \\ k_1 = 0,319 \end{cases}$$

D_E és el diàmetre exterior de cada tub (m)

N_t és el número de tubs

$$D_b = 0,0508 \cdot \left(\frac{939}{0,319} \right)^{1/2,142} = 2,115 \text{ m}$$

Al diàmetre de feix de tubs se l'hi ha de sumar l'espai que ha d'existir entre el feix de tubs i la paret externa de la carcassa, per tal d'obtenir així, el diàmetre de la carcassa. S'utilitza la següent figura, per a la determinació del diàmetre de carcassa:

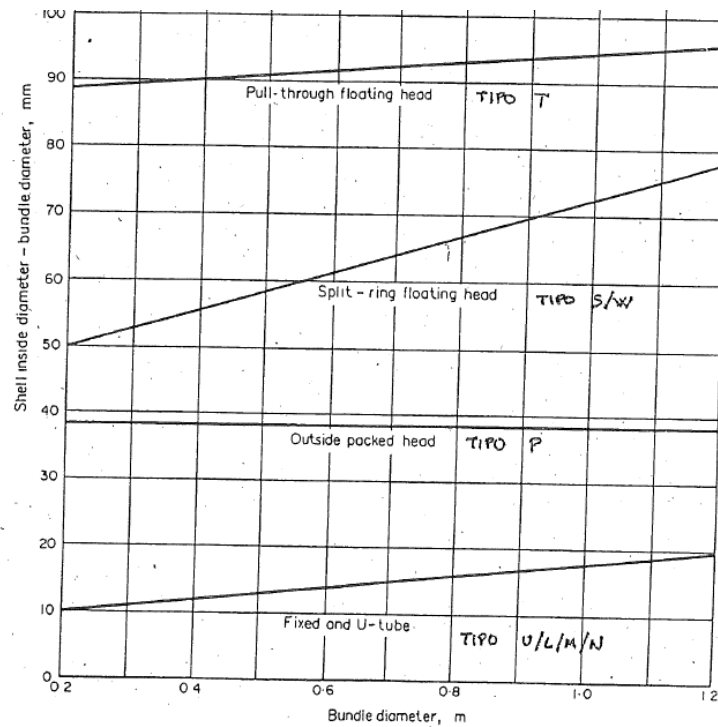


Figura 11.8.2: Relació distància des del feix de tubs a la carcassa amb el diàmetre d'aquesta, segons el tipus.

Es decideix emprar la carcassa tipus P, per tant, s'haurà d'afegir 0,038m:

$$D_s = D_b + 0,038 \text{ m} = 2,115 \text{ m} + 0,038 \text{ m} = 2,153 \text{ m}$$

Es calcula la velocitat de circulació del gas per dins dels tubs, tenint en compte que el cabal d'entrada es reparteix uniformement en els tubs i que la secció de pas de cada tub es veu reduïda per la presència de les partícules de catalitzador. Per tant, es fa una aproximació, considerant que un 55,6% de l'àrea està lliure (el que correspondria a la porositat):

$$v_s = \frac{Q}{N_t \cdot \varepsilon_{lit} \cdot A_{tub}}$$

On:

v_s és la velocitat superficial (m/h)

Q és el cabal de gas que circula pel reactor (m^3/h)

A_{tub} és l'àrea interna del tub (m^2)

$$v_s = \frac{630,98 \text{ m}^3/\text{h}}{0,0016 \text{ m}^2 \cdot 939 \cdot 0,556} = 751,2 \text{ m/h} = 0,209 \text{ m/s}$$

Per tal d'assegurar una correcta circulació pels tubs, es comprova que el Reynolds de les partícules estigui al voltant de 100, ja que el fluid que hi passa a través d'elles es troba en fase gas:

$$Re_p = \frac{\rho_m \cdot v_s \cdot D_p}{\mu_m}$$

On:

ρ_m és la densitat de la mescla reaccionant (kg/m^3)

D_p és el diàmetre de partícula catalítica (m)

μ_m és la viscositat de la mescla (kg/ms)

$$Re_p = \frac{4,562 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,209 \text{ m/s} \cdot 0,002 \text{ m}}{0,000017 \text{ kg/ms}} = 112,11$$

D'altra banda, s'haurà de comprovar la circulació en la zona de carcassa, és a dir, de l'oli tèrmic. Abans, però, és necessari dimensionar les pantalles deflectores, per tal de saber l'àrea de secció; els paràmetres que afectaran a aquesta són:

-Baffle cut: és l'alçada lliure que queda entre la pantalla i la carcassa, el percentatge òptim acostuma a oscil·lar entre el 20 i 25% del diàmetre de la carcassa, per tant es pren un 25%:

$$baffle\ cut = 0,25 \cdot D_s = 0,25 \cdot 2,153 \text{ m} = 0,54 \text{ m}$$

-Espaiat entre pantalles(lb): el rang òptim és entre un 30 i 50 % del diàmetre de la carcassa:

$$lb = 0,4 \cdot D_s = 0,4 \cdot 2,153 \text{ m} = 0,86 \text{ m}$$

-Per últim, el número de pantalles deflectores es calcularà com:

$$n^{\circ}deflectors = \left(\frac{L}{lb} \right) - 1 = \left(\frac{5,95 \text{ m}}{0,86 \text{ m}} \right) - 1 = 5,9 \approx 6$$

Així doncs, ja és possible calcular l'àrea de pas transversal de la carcassa, que equival a l'àrea de secció del fluid refrigerant:

$$A_{ST} = \frac{lb \cdot D_s \cdot (pitch - D_E)}{n_{ps} \cdot pitch}$$

On:

n_{ps} és el número de passos per carcassa, en aquest cas 1.

$$A_{ST} = \frac{0,86 \text{ m} \cdot 2,153 \text{ m} \cdot (0,0635 - 0,0508) \text{ m}}{1 \cdot 0,0635 \text{ m}} = 0,37 \text{ m}^2$$

Amb el cabal màssic de refrigerant obtingut anteriorment, l'àrea transversal i la densitat de l'oli (853,5 kg/m³) es determina la velocitat de l'oli tèrmic:

$$v_{oli} = \frac{m_{oli}}{A_{ST} \cdot \rho_{oli}} = \frac{40000 \text{ kg/h}}{0,37 \text{ m}^2 \cdot 853,5 \text{ kg/m}^3} = 0,35 \text{ m/s}$$

11.8.7. Càlcul de la pèrdua de càrrega al reactor

A continuació es calcula la pèrdua de càrrega que es dona al llarg del llit, mitjançant l'equació d'Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = A \cdot \frac{\mu_m \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot v_s}{\varepsilon^3 \cdot D_p^2} + B \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot v_s^2 \cdot \rho_m}{\varepsilon^3 \cdot D_p}$$

On:

ΔP és la caiguda de pressió (Pa)

L és la longitud del llit (m)

A i B són coeficients característics de l'equació (150 i 1,75 respectivament)

ε és la porositat del llit

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{0,000017 \cdot (1 - 0,556)^2 \cdot 0,209}{0,556^3 \cdot 0,002^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - 0,556) \cdot 0,209^2 \cdot 4,5669}{0,556^3 \cdot 0,002}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 600 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Per la llargada del reactor es donarà una caiguda de pressió de:

$$\Delta P = 600 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \cdot 5,95 \text{ m} = 3570 \text{ Pa}$$

11.8.8. Material de construcció del reactor

Per l'elecció del tipus de material de fabricació del reactor, primer, s'ha parat atenció en els fluids que hi circulen per dins d'aquest. Tant els clorofluorocarbonats com el tetraclorur de carboni, encara que són tòxics, nocius o perillosos pel medi ambient, no donen problemes de

corrosió. D'altra banda, el fluid refrigerant utilitzat és oli tèrmic, el qual tampoc és corrosiu; per tant, això dóna un rang més ample d'elecció.

També s'ha de tenir en compte les condicions de treball, donat que no es té una temperatura d'operació elevada i la pressió a la que es troba el reactor és atmosfèrica, no seran dos factors determinants a l'hora d'escollir el material de construcció.

S'opta per acer inoxidable de tipus austenític, en concret el 304, donat que suporta la corrosió en un rang molt ampli de temperatures i té unes característiques mecàniques excel·lents, el que fa que sigui l'acer inoxidable més utilitzat. Aquest tipus d'acer conté al voltant del 18% en crom i el 10% en níquel. Com que no està exposat a agents corrosius no seria necessària l'addició de molibdè, que seria l'acer inoxidable 316, així com al no treballar a altes temperatures no s'ha d'afegir cobalt.

D'altra banda, parant atenció a les taules de corrosió "chemical resistance guide" de Harrington, s'observa que pel tetràclorur de carboni, l'acer inoxidable més convenient és el 304, per la resta de reactius o productes, en canvi és indiferent.

11.8.9. Disseny mecànic

Pel disseny mecànic del reactor, s'ha seguit el codi ASME (Code for Pressure Vessels), es comença calculant el espessor del cos longitudinal del reactor.

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1$$

On:

R és el radi intern de la carcassa ($D_s/2$) (mm)

Pel que caldrà determinar prèviament alguns paràmetres com la pressió de disseny, la temperatura de disseny, l'eficiència de soldadura, etc.

-Pressió de disseny (P):

$$P_{disseny} = P_{operació} \cdot 1,1 = 1 \text{ atm} \cdot 1,1 = 1,1 \text{ atm}$$

-Temperatura de disseny:

$$T_{disseny} = T_{operació} + 20^\circ\text{C} = 125^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} = 145^\circ\text{C}$$

-Eficiència de soldadura (E): Per acer inoxidable 304, l'eficiència de soldadura acostuma a ser de tipus X i puntual, és a dir, $E=0,85$.

-Esforç de disseny (S): per la temperatura de treball i el material emprat, s'obté un valor de $137,5 \text{ N/mm}^2$ que equival a 1357 atm .

-Sobre espessor per corrosió (C_1):

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

Es substitueixen els valors obtinguts en l'equació, obtenint així:

$$t = \frac{1,1 \text{ atm} \cdot \frac{2153}{2} \text{ mm}}{1357 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,1 \text{ atm}} + 1 \text{ mm} = 2,03 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona l'espessor un 10%:

$$t_{\text{carcassa}} = 1,1 \cdot t = 1,1 \cdot 2,03 \text{ mm} = 2,23 \text{ mm}$$

Per tant, el diàmetre total del reactor serà la suma del diàmetre interior de la carcassa (D_s), calculat anteriorment, i el gruix d'aquesta:

$$D_{\text{reactor}} = D_s + 2 \cdot t_{\text{carcassa}} = 2,153 \text{ m} + 2 \cdot 0,00223 \text{ m} = 2,157 \text{ m}$$

Per últim, caldrà dimensionar els capçals i determinar l'espessor d'aquests. S'escull capçals de tipus torisfèric, per tal que es doni un millor repartiment del gas d'entrada entre tots els tubs que conformen el reactor.

S'utilitzen els mateixos paràmetres de disseny que per les parets del cilindre. Es suposa un relació L/r de 8 per tal determina el factor M:

D'altra banda, s'escull el valor de L com igual al del diàmetre de la carcassa:

$$L = 2,157 \text{ m}$$

Per tant r serà:

$$8 = \frac{L}{r} \rightarrow r = \frac{2,157 \text{ m}}{8} = 0,27 \text{ m}$$

Establerts aquests paràmetres es calcula l'espessor amb la següent equació:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} + C_1 = \frac{1,46 \cdot 1,1 \text{ atm} \cdot 2157 \text{ mm}}{2 \cdot 1357 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1,1 \text{ atm}} + 1 \text{ mm} = 2,5 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor obtingut:

$$t = 1,1 \cdot 2,5 \text{ mm} = 2,75 \text{ mm}$$

Un cop calculat el espessor del capçal, és possible calcular l'alçada d'aquest, el qual serà la suma de la part esfèrica i la part recta:

-Part esfèrica:

$$h_e = 0,1935 \cdot D_s - 0,455 \cdot t = 0,1935 \cdot 2,157 - 0,455 \cdot 0,00275$$

$$h_e = 0,416 \text{ m}$$

-Part recta:

$$h_r \geq 3,5 \cdot t$$

$$h_r = 3,5 \cdot 0,00275 \text{ m} = 0,0096 \text{ m}$$

Així doncs, l'alçada del capçal serà:

$$H_{\text{capçal}} = h_r + h_e = 0,416 \text{ m} + 0,0096 \text{ m} = 0,4256 \text{ m}$$

Amb la longitud dels tubs i l'alçada del capçal, es pot saber l'alçada total del reactor:

$$H_{\text{reactor}} = L + 2 \cdot H_{\text{capçal}} = 6 \text{ m} + 2 \cdot 0,4256$$

$$H_{\text{reactor}} = 6,85 \text{ m}$$

Per últim, es calcula el volum total del reactor, per fer-ho, es calcula per separat el volum del cilindre i el volum dels capçals:

-Volum cos cilíndric:

$$V_{\text{cilindre}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot 2,157^2 \cdot 6 = 21,9 \text{ m}^3$$

-Volum capçals: S'aplica l'aproximació donada en el capítol 10-140 "transport and storage of fluids" taula 10-65 "volume of heads" de Perry's Chemical Engineering Handbook per un capçal torisfèric ASME:

$$V_{\text{apçal}} = 0,513 \cdot h \cdot D_t^2 = 0,513 \cdot 0,4256 \cdot 2,157^2 = 1 \text{ m}^3$$

Tenint en compte tots dos capçals i el cos cilíndric del reactor, s'obté el volum total:

$$V_{\text{total reactor}} = V_{\text{cilindre}} + 2 \cdot V_{\text{capçal}} = 21,9 \text{ m}^3 + 2 \cdot 1 \text{ m}^3 = 23,9 \text{ m}^3$$

11.8.10. Pes del reactor buit

El pes del reactor buit serà la suma de la massa dels tubs, la carcassa i els capçals. El material escollit (acer inoxidable 304) té una densitat de:

$$\rho_{acer} = 7,93 \text{ g/cm}^3$$

S'estima prèviament, el volum d'acer que formaran les diferents peces, calculant-lo mitjançant la diferència de volums segons el diàmetre extern i intern.

-Tubs:

$$V_{acer\ tub} = \frac{\pi}{4} \cdot 6\ m \cdot 0,0508^2 - \frac{\pi}{4} \cdot 6\ m \cdot 0,04526^2 = 0,0025\ m^3$$

-Capçals:

$$V_{acer\ capçal} = 0,513 \cdot h_{Ext} \cdot D_{Ext}^2 - 0,513 \cdot h_{Int} \cdot D_{Int}^2 = 1,17 \cdot 10^{-2}\ m^3$$

-Carcassa:

$$V_{acer\ carcassa} = \frac{\pi}{4} \cdot 5,95 \cdot 2,157^2 - \frac{\pi}{4} \cdot 5,95 \cdot 2,152^2 = 0,09\ m^3$$

Amb el volum dels diferents components del reactor, es calcula el volum total d'acer i es multiplica per la densitat d'aquest, obtenint així, el pes total del reactor buit:

$$m_{reactor\ buit} = \rho_{acer} \cdot (N_t \cdot V_{acer\ tubs} + 2 \cdot V_{acer\ capçal} + V_{acer\ carcassa})$$

$$m_{reactor\ buit} = 19563,6\ kg$$

11.8.11. Pes del reactor ple

En aquest apartat, s'ha de tenir en compte tant el pes del reactor buit, com el del catalitzador, com el dels diferents fluids que hi circulen pel reactor:

-Catalitzador, tal i com s'ha calculat anteriorment, la massa de catalitzador és:

$$m_{catalitzador} = 8233,26\ kg$$

-Oli tèrmic, es calcula el volum del costat de carcassa, i es considera que es troba ple d'oli tèrmic, per últim multiplicant per la densitat es troba el pes de l'oli:

$$m_{oli} = V_{carcassa} \cdot \rho_{oli} = 10,33\ m^3 \cdot 853,5\ kg/m^3 = 8818,4\ kg$$

-Fluid reacció, es calcula el volum lliure que hi haurà dins dels tubs amb la porositat, el qual estarà ocupat pel gas que circula, amb la mitjana de les densitats a l'entrada i a la sortida del reactor, es calcula el pes que suposarà el gas:

$$m_{gas} = V_{lliure\ tubs} \cdot \rho_{mitjana\ gas} = 22,8\ kg$$

Fent el sumatori dels valors obtinguts, s'obté:

$$m_{reactor\ ple} = m_{reactor\ buit} + m_{catalitzador} + m_{oli} + m_{gas}$$

$$m_{reactor\ ple} = 19563,6\ kg + 8233,26\ kg + 8818,4\ kg + 22,8\ kg = 36638\ kg$$

11.9. Disseny de bescanviadors

En aquest apartat s'inclou tant l'explicació del mètode seguit pels bescanviadors de calor que es troben en els diferents corrents, com pels condensadors i pels calderins de les columnes de destil·lació, donat que el procés seguit pel disseny de tots plegats és el mateix. Per escalfar o refredar els corrents del procés s'ha emprat oli tèrmic "Dowtherm J", provinent de la caldera, el chiller o la torre de refrigeració tal i com s'especifica en el apartat de serveis.

S'ha emprat el software *Aspen Exchanger Design and Rating* pel disseny de tots el intercanviadors de la planta, donat que ens permet obtenir totes les dades necessàries per especificar un bescanviador de calor, tant tèrmiques com mecàniques, mitjançant un procés senzill, a la vegada que ràpid.

La base teòrica en la que es fonamenta és el mètode KERN, el qual s'explicarà a continuació.

11.9.1. Mètode Kern

Primer, s'ha de decidir quin fluid circularà per carcassa i quin pels tubs; per decidir-ho, s'han seguit els següents criteris:

-Per carcassa:

-Fluid que canvia de fase

-Menys cabal

-Per tubs:

-Temperatura més alta

-Major pressió

-Més tòxic o corrosiu

Una vegada seleccionada la zona de circulació de cada fluid, es procedeix a comprovar la següent igualtat:

$$Q_Q = m_s \cdot C_{ps} \cdot (T_{2,s} - T_{1,s}) = m_t \cdot C_{pt} \cdot (T_{1,t} - T_{2,t})$$

On:

El subíndex s fa referència al costat de la carcassa

El subíndex t fa referència al fluid que circula pels tubs

Q_Q és el calor bescanviat (W)

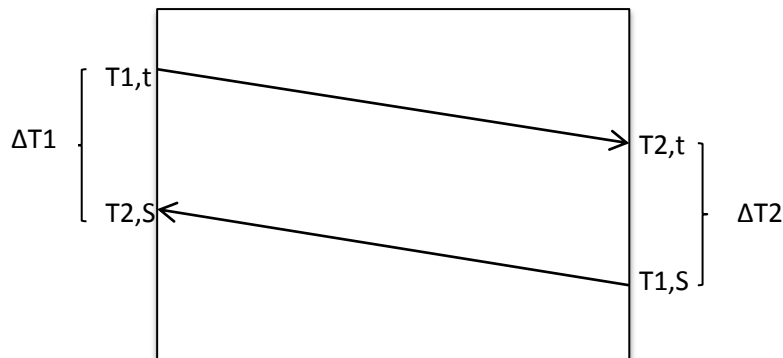
m és el cabal màssic (kg/s)

C_p és el calor específic (J/kg°C)

T_1 és la temperatura a l'entrada del fluid (°C)

T_2 és la temperatura a la que surt el fluid (°C).

En tots els bescanviadors s'ha optat per una circulació en contracorrent dels fluids, degut a que amb aquest tipus de circulació, es dona una transferència de calor més òptima gràcies al gradient constant que hi ha de temperatura:



$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Inicialment, es suposa un número de passos per tub i per carcassa de 1, es pren un valor aproximat bibliogràfic del coeficient global, i es calcula així l'àrea de bescanvi de calor:

$$A = \frac{Q_Q}{U \cdot (\Delta T_{ml})_c}$$

On:

A és l'àrea de bescanvi (m^2)

U és el coeficient global de transmissió de calor ($W/m^2\text{°C}$)

$(\Delta T_{ml})_c$ és la variació mitjana logarítmica de la temperatura corregida (°C)

$$(\Delta T_{ml})_c = \Delta T_{ml} \cdot F$$

On:

ΔT_{ml} és la variació mitjana logarítmica de la temperatura (°C)

F és un factor de correcció que s'avalua gràficament, si és major que 0,85 es corregeix el ΔT_{ml} , sino es modifica el número de passos per carcassa:

A continuació, es seleccionen les característiques dels tubs, longitud (L), diàmetre extern (D_E) i gruix (Δx), s'ha de tenir en compte que a la llargada del tub se l'hi haurà de restar un mínim de 2,5 cm per cada banda, per tal de connectar-los amb el capçal. D'aquesta manera, és possible calcular l'àrea de transferència de cada tub:

$$A_{tub} = \pi \cdot D_E \cdot L$$

A partir d'aquest resultat, relacionant-lo amb l'àrea total de bescanvi necessària, es pot calcular el número de tubs:

$$N_t = \frac{A}{A_{tub}}$$

També, s'ha de decidir la disposició dels tubs; si es vol assolir una velocitat de transferència de calor major, s'utilitza pitch triangular o romboïdal, d'altra banda, si es necessita netejar mecànicament el costat de la carcassa serà més convenient el pitch quadrat.

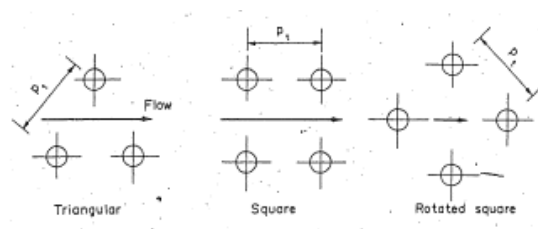


Figura 11.9.3: Possibles distribucions dels tubs.

El pitch és la distància entre el centre d'un tub i el centre del tub consecutiu; generalment, haurà de ser 1,25 vegades el diàmetre exterior dels tubs:

$$pitch = 1,25 \cdot D_E$$

Un cop escollida la distribució, es determina el valor de n_1 i K_1 , el que permetrà calcular el diàmetre del feix de tubs:

$$D_b = D_E \cdot \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$$

On:

D_b és el diàmetre del feix de tubs (m)

K_1 i n_1 són funció del pitch escollit i el número de passos per tubs

S'escull el tipus de carcassa que s'utilitzarà, d'aquesta manera es pot determinar gràficament amb el valor del diàmetre del feix de tubs la distància que hi haurà d'haver entre el feix de tubs i la carcassa:

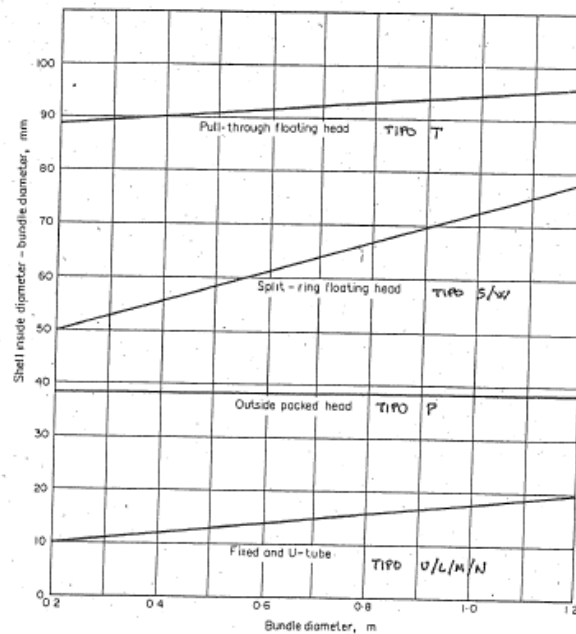


Figura 11.9.4: Distància entre el feix de tubs i la carcassa, en funció del diàmetre i el tipus de carcassa.

Per tant, sumant aquest valor obtingut a D_b s'obté el diàmetre de la carcassa:

$$D_s = D_b + \text{distància}$$

A continuació, s'ha de comprovar que la relació L/D_s estigui compresa entre 4 i 6. En cas de ser major a 6 es disminueix la longitud, en canvi si és menor a quatre, la longitud s'augmenta.

Un cop determinat el diàmetre de la carcassa, es pot establir les característiques de les pantalles deflectores, el que afectarà a la velocitat del fluid de la banda de la carcassa:

-Baffle cut, és l'espai que queda lliure entre la pantalla i la carcassa, és entre el 15% i 45% del diàmetre de la carcassa, essent el rang òptim entre 20 i 25%.

-L'espaiat entre pantalles (l_B), és entre 0,2 i 1 el diàmetre de la carcassa, el rang òptim és d'entre 0,3 i 0,5 vegades.

-Número de pantalles deflectores, el qual es calcula com $(L/l_B)-1$

També s'ha de comprovar que les velocitats de circulació, tant del fluid que circula per tubs, com del que circula per carcassa, estigui dins dels rangs típics:

- Líquids, depèn del lloc de circulació:
 - Per tubs: acostuma a ser d'1 a 2 m/s, 4m/s com a màxim si es vol evitar embrutiment.
 - Per carcassa: de 0,3 a 1m/s.
- Vapors, depèn de la pressió d'operació:
 - A pressió atmosfèrica: de 10 a 30 m/s
 - Buit: entre 50 i 70 m/s
 - A altes pressions: entre 5 i 10 m/s

Velocitat de circulació per tubs

Per calcular la velocitat del fluid que circula per tubs, prèviament s'ha d'haver calculat el número de tubs per pas (N_{tp}), el qual és la relació entre el número de tubs i el número de passos per tub, i l'àrea de pas de cada tub:

$$N_{tp} = \frac{N_t}{n_{pt}}$$

$$A_{secció\ tub} = \frac{\pi}{4} \cdot D_I^2$$

On D_I és el diàmetre interior de cada tub, definit com $D_I = D_E - 2 \cdot \Delta x$

Així doncs, és possible calcular la velocitat de circulació de dins dels tubs (v_t) tenint en compte el cabal volumètric que passa (Q):

$$v_t = \frac{Q}{A_{secció\ tub} \cdot N_{tp}}$$

En el cas que la velocitat obtinguda no estigui dins el rang, es torna a calcular el número de passos per tubs a partir d'una velocitat suposada que sí que es trobi dins de les esperades. S'ha de tenir en compte que el número de passos per tub ha de ser parell, per tant, s'haurà d'arrodonir.

D'altra banda, al variar el número de passos per tubs és possible que el increment de temperatura mitjà logarítmic s'hagi de corregir a partir del factor F.

Al haver fet arrodoniments en el número de tubs o el número de passos per tub, l'àrea de transferència pot haver-se vist modificada, el que farà necessari recalculer-la, així com el coeficient global.

Velocitat de circulació per carcassa

Amb les especificacions geomètriques de la carcassa establertes anteriorment, es pot calcular l'àrea transversal de la carcassa:

$$A_{ST} = \frac{l_B \cdot D_s \cdot (pitch - D_E)}{pitch \cdot n_{ps}}$$

Amb el cabal volumètric que circula per la carcassa i el valor obtingut, es calcula la velocitat del fluid de la carcassa:

$$v_s = \frac{Q_s}{A_{ST}}$$

Es compara amb els valors típics; en cas de no trobar-se dins del rang es varien les especificacions geomètriques de la carcassa establertes anteriorment.

Determinació de U a partir dels coeficients individuals i els factors d'embrutiment

Per tal de poder calcular el coeficient individual del costat del tub, prèviament, s'han de determinar les propietats físiques del fluid, i s'ha de seguir el següent ordre:

-La secció de pas de tots els tubs d'un mateix pas, la qual es calcula com:

$$A_{pas\ t} = N_t \cdot \frac{A_{secció\ tub}}{n_{pt}}$$

-El diàmetre equivalent del costat dels tubs (D_{eq}), el qual és igual al diàmetre interior.

-Densitat de flux màssic (G_t), és la relació entre el cabal màssic (m_t) i l'àrea de pas total:

$$G_t = \frac{m_t}{A_{pas\ t}}$$

-Els números adimensionals de Reynolds i Prandtl:

$$Re = \frac{D_{eq} \cdot G_t}{\mu} \quad Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad \text{On } \begin{cases} c_p \text{ és el calor específic del fluid} \\ \mu \text{ és la viscositat} \\ k \text{ és la conductivitat tèrmica} \end{cases}$$

-Coeficient individual, es calcula a partir del factor de transferència de calor (j_H), el qual es determina gràficament mitjançant el número de Reynolds i la relació L/D_i .

$$\frac{h_t \cdot D_i}{k} = j_H \cdot Re \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

Inicialment, es realitza el càlcul menyspreant la variació de la viscositat amb la temperatura, per poder calcular la temperatura a la paret (T_w) mitjançant:

$$h_t \cdot (T - T_w) = U \cdot (T - t)$$

On:

T és la temperatura mitjana del tub

t és la temperatura mitjana de la carcassa

U és el coeficient global suposat

Una vegada s'obté la temperatura a la paret, es busca bibliogràficament la viscositat del fluid en aquestes condicions, per tal de tornar a calcular el coeficient individual, tot tenint en compte la variació de la viscositat. Per últim, cal comprovar que el valor obtingut concordi amb els valors típics pel tipus de fluid i l'estat físic d'aquest.

D'altra banda, el coeficient individual del costat de la carcassa es calcula seguint el següent procediment:

- Cabal màssic per unitat d'àrea (G_s), és la relació entre el cabal màssic de fluid que passa per la carcassa (m_s) i l'àrea transversal calculada anteriorment:

$$G_s = \frac{m_s}{A_{ST}}$$

-Diàmetre equivalent de carcassa (D_{eq}), depèn del pitch:

$$\text{per pitch triangular} \rightarrow D_{eq} = \frac{1,1}{D_E} \cdot (\text{pitch}^2 - 0,917 \cdot D_E^2)$$

$$\text{per pitch quadrat} \rightarrow D_{eq} = \frac{1,27}{D_E} \cdot (\text{pitch}^2 - 0,785 \cdot D_E^2)$$

-Números de Prandtl i Reynolds de carcassa:

$$Re_s = \frac{D_{eq} \cdot G_s}{\mu_s} \quad Pr_s = \frac{c_p \cdot \mu}{k}$$

-Coeficient individual de transmissió de calor costat carcassa (h_s), novament, es calcula a partir del factor de transferència de calor (j_h), amb la diferència que aquest es determina gràficament en funció del baffle cut i del Reynolds de carcassa.

$$\frac{h_s \cdot D_{eq}}{k} = j_h \cdot Re_s \cdot Pr_s^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Cal comprovar que el valor calculat estigui dins dels límits dels valors típics pel tipus de fluid i l'estat físic en el que es troba.

És necessari tenir valors típics del factor d'embrutiment (h_R) pels fluids que intervenen, tenint en compte les dues bandes si és necessari.

D'aquesta manera, ja és possible calcular el coeficient global real de transmissió de calor (U_R):

$$\frac{1}{U_R} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_R} + \frac{D_E \cdot \ln\left(\frac{D_E}{D_I}\right)}{2 \cdot k} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{h_t}$$

Si el valor obtingut és igual o major que el 15% del coeficient global suposat, es pot considerar correcte, ja que el bescanviador estarà sobredimensionat; en canvi, si és menor, estarà infradimensionat, i si sobrepassa aquest 15% estarà massa sobredimensionat, el que obligarà a tornar a començar suposant un nou valor de U .

Càlcul de les pèrdues de pressió

Per últim, cal fer una última comprovació per tal de donar per vàlid el disseny realitzat; s'ha de parlar atenció tant a les pèrdues de pressió que es donen al costat dels tubs com a les de la carcassa i comparar-les amb valors típics:

-Per líquids:

$$\mu < 1cp \rightarrow \Delta P < 35 \text{ kN/m}^2$$

$$1cp < \mu < 10cp \rightarrow 5 < \Delta P < 70 \text{ kN/m}^2$$

-Per gasos:

$$buit\ elevat \rightarrow 0,4 - 0,8\ kN/m^2$$

$$buit\ mitjà \rightarrow 0,1 \cdot P_{absoluta}$$

$$1\ a\ 2\ bar \rightarrow 0,5 \cdot Pressió\ manomètrica$$

$$> 10\ atm \rightarrow 0,1 \cdot Pressió\ manomètric$$

- Costat tubs

Les pèrdues de pressió són degudes a pèrdues per fricció i a contraccions i expansions, segons com es consideri s'utilitzen les següents expressions:

$$1) \text{ Per sistemes isoterms} \quad \Delta P_t = 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho \cdot v_t^2}{2} \cdot \left(\frac{L}{D_I}\right)$$

On: j_f es calcula gràficament amb el número de Reynolds

ρ és la densitat del fluid de dins dels tubs a les condicions a les que es troba

$$2) \text{ Per sistemes no isoterms} \quad \Delta P_t = 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho \cdot v_t^2}{2} \cdot \left(\frac{L}{D_I}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-m}$$

On: m depèn del número de Reynolds

Per $Re < 2100$ $m = 0,25$

Per $Re > 2100$ $m = 0,14$

$$3) \text{ Considerant contracció i expansió} \quad \Delta P_t = N_p \cdot \left[8 \cdot j_f \cdot \left(\frac{L}{D_I}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-m} + 2,5 \right] \cdot \frac{\rho \cdot v_t^2}{2}$$

-Costat carcassa

Les pèrdues al costat de la carcassa es calculen segons:

$$\Delta P_s = n_s \cdot 8 \cdot j_f \cdot \frac{\rho \cdot v_t^2}{2} \cdot \left(\frac{D_s}{D_{eq}}\right) \left(\frac{L}{l_B}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0,14}$$

On: j_f es calcula gràficament amb el número de Reynolds i el percentatge de baffle cut

Si les caigudes de pressió estan compreses dins dels valors esperats, el bescanviador dissenyat es dona per bo, en el cas que es superi els límits, s'haurà de variar la velocitat de circulació dels fluids, tenint en compte que velocitats altes generen grans pèrdues de pressió, però a la vegada fan augmentar els coeficients de transmissió de calor.

11.9.2. Disseny amb Aspen Hysys

Pel disseny dels bescanviadors amb el software Exchanger Design and Rating User Interface, únicament és necessari establir certs límits i especificar els corrents d'entrada i sortida.

Primerament, s'especifica les condicions d'entrada i sortida del fluid calent i del fluid fred, així com el cabal que hi circula, fent que la igualtat del balanç energètic es compleixi:

✓ Process Data

	Hot Stream (1) Shell Side		Cold Stream (2) Tube Side	
Fluid name	OLI TÈRMIC		HF	
Mass flow rate (total)	kg/h	In: 5000 Out:	In: 854 Out:	
Temperature	C	In: 128,19 Out:	In: 20,2 Out: 99,3	
Vapor mass fraction				
Operating pressure (absolute)	atm	In: 1 Out: 0,891	In: 10,017 Out: 10	

Figura 11.9.2.1: Especificacions dels corrents que circulen pel bescanviador.

A continuació, s'especifiquen les composicions del fluid fred i del calent, per tal d'obtenir les propietats dels corrents a les temperatures i pressions de treball, emprant el "fluid Package" NRTL-RK:

✓ Composition | ✓ Property Methods | ✓ Advanced Options

Physical property package: Aspen Properties

Hot side composition specification: Weight flowrate or %

	Aspen Component Name	Composition	Aspen Formula
1	HYDROGEN-FLUORIDE	0	HF
2	DOWTHERM-J	1	DOWJ
3			
4			

Figura 11.9.2.2: Especificació de la composició dels corrents.

✓ Properties | ✓ Phase Compositions | ✓ Component Properties | Properties Plots

Get Properties: ☐ Overwrite properties ☐ Restore Defaults

Temperature Points: Number: 22, Temperatures: Specify range, Range: 200 40 C

Pressure Levels: Number: 2, Pressures: 9,869 1,974 atm, Add Set, Delete Set

	1	2	3	4	5	
Temperature	C	302	200	193,32	186,58	179,75
Liquid density	kg/m3	588,63	711,72	718,38	725,01	731,6
Liquid specific heat	kJ/(kg*K)	2,986	2,428	2,402	2,376	2,349
Liquid viscosity	mPa*s	0,1699	0,2338	0,2402	0,247	0,2544
Liquid thermal cond.	W/(m*K)	0,069	0,0904	0,0918	0,0932	0,0946
Liquid surface tension	N/m	0,0047	0,0129	0,0135	0,0141	0,0147
Liquid molecular weight		134,2212	134,2212	134,2212	134,2212	134,2212
Specific enthalpy	kJ/kg	114,5	-157,5	-173,6	-189,7	-205,9
Vapor mass fraction		0	0	0	0	0
Vapor density	kg/m3					
Vapor specific heat	kJ/(kg*K)					
Vapor viscosity	mPa*s					
Vapor thermal cond.	W/(m*K)					
Vapor molecular weight						

Figura 11.9.2.3: Obtenció de les propietats dels corrents al rang de temperatura i pressió de treball.

S'escull el material de construcció i el tipus de bescanviador. Pels reboilers s'ha de seleccionar el Kettle, en canvi per la resta d'intercanviadors es pot escollir; inicialment, s'ha seleccionat un sol pas per carcassa, però en funció de les velocitats obtingudes s'ha optat per un altre tipus de bescanviador com dos passos per carcassa amb un baffle:

Component	Material	Designator
Default exchanger material	SS 316	8
Cylinder - hot side	SS 316	8
Cylinder - cold side	SS 316	8
Tubesheet	SS 316	8
Double tubesheet (inner)	Set Default	0
Baffles	SS 316	8
Tube material	SS 316	8
Fin material	Set Default	0

Figura 11.9.2.4: Selecció del material de construcció.

Figura 11.9.2.5: Selecció del tipus de bescanviador.

Un cop establert el problema de disseny, es fa córrer el programa i es para atenció en les velocitats obtingudes i la relació L/D_s , si aquestes no es troben dins dels rangs esperats, es varien certes opcions de disseny, fins a aconseguir els valors esperats:

✓ Geometry Options | **✓ Geometry Limits** | ✓ Process Limits | ✓ Optimization Options

Geometry Limits

	Increment	Minimum	Maximum
Shell diameter	mm 25,4	152	2000
Tube length	mm 50	200	1000
Tube passes	1,2,4,6	1	8
Baffle spacing	mm	50,8	200
Baffle cut (% of diameter)		10	40
Shells in series		1	6
Shells in parallel		1	10
Use pipe for shells below this diameter		609,6	mm

Figura 11.9.2.6: Paràmetres a variar per tal de complir els límits.

✓ Geometry | **Tube Layout**

Front head type: B - bonnet bolted or integral with tubesheet

Shell type: E - one pass shell

Rear head type: M - bonnet

Exchanger position: Horizontal

Shell(s)

ID: mm

OD: mm

series: ☐

parallel: ☐

Tubes

Number:

Length: mm

OD: 13 mm

Thickness: 2,6 mm

Tube Layout

New (optimum) layout: Tubes: 30

Tube Passes:

Pitch: 21 mm

Pattern: 30-Triangular

Baffles

Spacing (center-center): mm

Spacing at inlet: mm

Number:

Spacing at outlet: mm

Type: Single segmental

Tubes in window: Yes

Orientation: Horizontal

Cut(%d):

Figura 11.9.2.7: Paràmetres a variar per tal d'assolir els valors típics.

Seguint aquest procediment, s'aconsegueix el disseny exhaustiu de tots els bescanviadors, reboilers i condensadors del procés, les dimensions més concretes es troben als fulls d'especificacions de cadascun, encara que a continuació es fa un breu resum de cada bescanviador.

11.9.3. Bescanviadors del procés

11.9.3.1. Bescanviador E-201

En aquest equip s'escalfa el fluorur d'hidrogen pur que prové dels tancs d'emmagatzematge, per tal que els reactius entrin al reactor a la temperatura d'operació d'aquest. S'utilitza oli tèrmic provinent de la caldera, que prèviament ha passat pel reboiler RB-301. Donat que no es dona cap canvi de fase, ja que hi ha una pressió elevada, i per tant, el fluorur d'hidrogen roman líquid, aquest circularà per dins dels tubs i l'oli tèrmic per la carcassa. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.1.1: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Oli tèrmic caldera		Corrent 2	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	5000		854	
Temperatura (°C)	128,19	99,34	20,2	99,3

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.1.2: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
2,3	840,2

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.1.3: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
13	1000	6	30

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.1.4: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
168,28	5,94

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.1.5: Especificacions de la carcassa.

n_{PS}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
1	14	50,8

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.3.1.6: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
0,58	1,33

11.9.3.2. Bescanviador E-202

Per tal de fer un estalvi energètic, s'aprofita la temperatura ambient del tetraclorur per refredar el corrent d'entrada a la columna de destil·lació 4, corrent 52, d'aquesta manera, el tetraclorur també s'escalfa, encara que no arriba fins a la temperatura necessària; per tant, caldrà afegir un bescanviador en sèrie a continuació d'aquest. Tots dos fluids es troben en fase líquida, no es dona cap canvi de fase, així doncs, el tetraclorur circularà pel costat dels tubs, ja que es troba a més pressió i té un cabal major. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.2.7: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 52		Corrent 5	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	1385		2189	
Temperatura (°C)	99,89	79,23	42,63	110

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.2.8: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
3,7	46,4

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.2.9: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
13	600	8	20

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.2.10: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D_s (mm)	L/D_s
141,3	4,25

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.2.11: Especificacions de la carcassa.

n_{ps}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
2	3	114,3

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.3.2.12: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
0,39	1,04

11.9.3.3. Bescanviador E-204

Per tal de minimitzar el consum energètic del chiller, primer es refreda el corrent a una temperatura més moderada, per refredar-lo posteriorment fins a la temperatura desitjada amb l'oli tèrmic provinent del chiller. En aquest bescanviador, es refreda el vapor que surt del reactor R-201, donant-se, en part, un canvi de fase, el que determinarà el costat de circulació de cada fluid, l'oli pels tubs i el corrent 7 per carcassa. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.3.13: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 7		Oli tèrmic torre	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	5576		15000	

Temperatura (°C)	90	35	29	37,34
-------------------------	----	----	----	-------

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.3.14: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m²)	U (W/m²K)
14	202,5

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.3.15: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
19,05	1390	6	88

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.3.16: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D_s (mm)	L/D_s
323,85	4,29

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.4.17: Especificacions de la carcassa.

n_{ps}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
1	6	160

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que el fluid que circula per carcassa és un gas a pressió i l'altre es troba en fase líquida:

Taula 11.9.3.3.18: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
6,92	1,53

11.9.3.4. Bescanviador E-205

En aquest equip, s'acaba de refredar amb Dowtherm J del circuit de chiller el corrent que prové del bescanviador E-204. El corrent entra al bescanviador sent parcialment vapor i surt en estat líquid, per tant circularà pel costat de carcassa. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.4.19: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 7a		Oli tèrmic chiller	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	5576		14650	
Temperatura (°C)	35	-15	-44	-34

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.4.20: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
8,9	160,4

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.4.21: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
19,05	1800	6	86

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.4.22: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
323,85	5,56

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.4.23: Especificacions de la carcassa.

n_{PS}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
1	15	90

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que el fluid que circula per carcassa és un gas a pressió i l'altre es troba en fase líquida:

Taula 11.9.3.4.24: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
6,6	1,45

11.9.3.5. Bescanviador E-206

En el present equip es refreda el corrent que es troba en fase líquida que surt del reactor amb oli del circuit de torre de refrigeració, per tal que aquest entri a la temperatura òptima a la columna de rectificació CD-301 després de descomprimir-lo. Donat que està a pressió i té temperatures més elevades, circularà per dins dels tubs i l'oli tèrmic per la carcassa. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.5.25: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Oli tèrmic torre		Corrent 9	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	1000		197	
Temperatura (°C)	29	32,71	90	43,2

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.5.26: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
0,3	231,8

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.5.27: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
13	600	2	12

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.5.28: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

Ds (mm)	L/Ds
108	5,56

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.5.29: Especificacions de la carcassa.

n _{ps}	Nº baffles	Distància entre bafles (mm)
2	9	50,8

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.3.5.30: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v _s (m/s)	v _t (m/s)
0,46	1,03

11.9.3.6. Bescanviador E-301

En el present bescanviador, es refreda amb oli tèrmic provinent de la torre de refrigeració el corrent que surt per caps de la torre d'absorció, el qual està compostat per aigua i aire en estat gas, per tal de condensar aquesta aigua sobrant de l'absorció, poder-la recircular de nou a l'entrada de la torre, i d'aquesta manera reduir els requeriments d'aigua de la planta. Com que es dona un canvi de fase, l'oli tèrmic circularà pels tubs. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.6.31: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 31		Oli tèrmic torre	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	883		125000	
Temperatura (°C)	95,87	35,42	29	38,98

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.6.32: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
18,8	689,5

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.6.33: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
19,05	2000	1	162

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.6.34: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
369,98	5,41

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.6.35: Especificacions de la carcassa.

n _{PS}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
1	8	196,85

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que el fluid que circula per carcassa és un gas a pressió atmosfèrica i l'altre es troba en fase líquida:

Taula 11.9.3.6.36: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v _s (m/s)	v _t (m/s)
23,78	1,29

11.9.3.7. Bescanviador E-302

Es refreda l'àcid clorhídric comercial obtingut per cues de la torre d'absorció en fase líquida, per tal de poder-lo emmagatzemar amb seguretat. Donat que tots dos corrents es troben a pressió atmosfèrica i a temperatures moderades, però el cabal d'oli és molt més gran, aquest circularà per dins dels tubs. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.7.37: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 29		Oli tèrmic torre	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	4449		21674	
Temperatura (°C)	61,36	30	29	39

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.7.38: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
12	461,5

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.7.39: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
19,05	1500	6	140

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.7.40: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
360,36	4,16

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.7.41: Especificacions de la carcassa.

n_{PS}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
2	19	69,85

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.3.7.42: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
0,42	1,56

11.9.3.8. Bescanviador E-401

S'aprofita el calor del corrent que surt en fase gas del reactor R-401 i s'ha comprimit, corrent 41, escalfant el corrent 37, el qual surt per cues de la columna de rectificació CD-302, per tal que aquest entri en fase gas i a la temperatura òptima al reactor R-401. Es dona canvi de fase del corrent 37, per tant aquest circularà per carcassa ja que el corrent 41 roman en fase gasosa. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.8.43: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 41		Corrent 37	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	2585		2872	
Temperatura (°C)	33,25	125	195	120,5

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.8.44: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
5,2	112,5

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.8.45: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
19,05	1300	2	35

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.8.46: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

Ds (mm)	L/Ds
219,08	5,93

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.8.47: Especificacions de la carcassa.

n _{ps}	Nº baffles	Distància entre bafles (mm)
1	4	165,1

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids se troben en fase gasosa, però el que circula per carcassa a pressió atmosfèrica i el del costat dels tubs a alta pressió:

Taula 11.9.3.8.48: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v _s (m/s)	v _t (m/s)
23,59	7,95

11.9.3.9. Bescanviador E-402

Encara que en el bescanviador E-401 s'arriba a la temperatura a la qual els reactius han d'entrar al reactor R-401, s'ha d'afegir un bescanviador en sèrie, tant per seguretat com per a la posada en marxa, donat que en el bescanviador anterior s'aprofiten corrents i no seria possible augmentar cabals en el cas de no arribar a la temperatura desitjada. S'ha dissenyat el bescanviador per el cas més desfavorable, que seria la posada en marxa, quan encara no hi ha un corrent de sortida del reactor R-401. Per tant, tal i com en el bescanviador anterior, el corrent 30 s'escalfa i canvia de fase, el que determina que circuli pel costat de la carcassa; d'altra banda, l'oli tèrmic que prové de la caldera circula pels tubs. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.9.49: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Oli tèrmic caldera		Corrent 39	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	25000		2585	

Temperatura (°C)	128,19	125,42	33,25	125
-------------------------	--------	--------	-------	-----

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.9.50: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m²)	U (W/m²K)
18,9	75

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.9.51: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
19,05	1778	4	184

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa i la relació L/D_s:

Taula 11.9.3.9.52: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D_s (mm)	L/D_s
406,4	4,38

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.9.53: Especificacions de la carcassa.

n_{PS}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
1	6	203,2

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que el fluid que circula per tubs és vapor a pressió atmosfèrica i l'altre és líquid:

Taula 11.9.3.9.54: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
0,5	22,89

11.9.3.10. Bescanviador E-403

Entra el corrent que surt del bescanviador E-401 a una temperatura elevada; tal i com s'ha fet anteriorment, es refreda fins a una temperatura moderada amb oli tèrmic de torre, per refredar-lo posteriorment en un altre bescanviador (E-404) amb l'oli del circuit de chiller fins a la temperatura necessària. Es dona una condensació parcial del corrent 34, per tant, aquest circularà per carcassa. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.10.55: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 42		Oli tèrmic torre	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	2872		24000	
Temperatura (°C)	120,5	34,61	29	39,08

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.10.56: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
1,8	1600,8

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.10.57: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
16	1000	2	39

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.10.58: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
168,28	5,94

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.10.59: Especificacions de la carcassa.

n _{PS}	Nº baffles	Distància entre bafles (mm)
-----------------	------------	-----------------------------

1	14	50,8
---	----	------

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que el fluid que circula per tubs és líquid i l'altra parcialment vapor:

Taula 11.9.3.10.60: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
7,36	1,78

11.9.3.11. Bescanviador E-404

S'acaba de refredar el corrent 35, per que entri en estat líquid i a la temperatura idònia a la columna de destil·lació CD-501. Com que canvia de fase, circula per carcassa i l'oli Dowtherm J que prové del chiller per dins dels tubs. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.11.61: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Oli tèrmic chiller		Corrent 43	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	20775		2872	
Temperatura (°C)	-44	-34	34,61	-15,2

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.11.62: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
3,5	438,7

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.11.63: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
19,05	1240	8	50

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.11.64: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

Ds (mm)	L/Ds
273,05	4,54

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.3.11.65: Especificacions de la carcassa.

n _{ps}	Nº baffles	Distància entre bafles (mm)
1	6	120

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que el fluid que circula per carcassa es troba en fase líquida i per tubs circula vapor a alta pressió:

Taula 11.9.3.11.66: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v _s (m/s)	v _t (m/s)
0,84	6,49

11.9.3.12. Bescanviador E-501

En aquest cas, ocorre el mateix que amb el bescanviador E-402, és un bescanviador que en el moment en que s'assoleix l'estat estacionari no hauria d'estar en funcionament ja que amb el bescanviador E-202, ja s'arriba a la temperatura d'entrada del corrent a la torre de rectificació CD-502. Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.3.12.67: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 53		Oli tèrmic torre	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	1385		1931	
Temperatura (°C)	99,89	79,23	29	39

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.3.12.68: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
------------------------	------------------------

0,9	181,5
-----	-------

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.3.12.69: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
13	600	2	15

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.3.12.70: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D_s (mm)	L/D_s
114,3	5,25

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus CFM, té dos passos per carcassa:

Taula 11.9.3.12.71: Especificacions de la carcassa.

n_{ps}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
2	3	114,3

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.3.12.72: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
0,3	1,56

11.9.4. Condensadors

La condensació del vapor que puja per les columnes de rectificació del procés, es fa mitjançant oli tèrmic provinent del chiller. Degut al canvi de fase que es dona, en tots els condensadors, el fluid de dins dels tubs serà l'oli tèrmic i el de carcassa el corrent de la columna.

11.9.4.1. Condensador C-301

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.4.1.73: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 17		Oli tèrmic chiller	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	6176		134627	
Temperatura (°C)	0,75	-28,54	-44	-31

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.4.1.74: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
67,3	403,2

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.4.1.75: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
19,05	3000	4	384

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.4.1.76: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
560,39	5,35

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.4.1.77: Especificacions de la carcassa.

n _{PS}	Nº baffles	Distància entre bafles (mm)
2	25	107,95

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.4.1.78: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
7,87	1,06

11.9.4.2. Condensador C-302

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.4.2.79: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 23		Oli tèrmic chiller	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	2489		53442	
Temperatura (°C)	-38,19	-38,19	-44	-39

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.4.2.80: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
53,7	741,4

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.4.2.81: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{pt}	N_t
19,05	2500	4	369

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.4.2.82: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D_s (mm)	L/D_s
558,8	4,47

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.4.2.83: Especificacions de la carcassa.

n_{ps}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
1	20	107,95

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.4.2.84: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
7,03	1,22

11.9.4.3. Condensador C-501

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.4.3.85: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 45		Oli tèrmic chiller	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	2596		32516	
Temperatura (°C)	-34,95	-35,27	-44	-37

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.4.3.86: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
21,9	934,3

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.4.3.87: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{pt}	N_t
19,05	2000	4	189

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.4.3.88: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

Ds (mm)	L/Ds
406,4	4,92

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.4.3.89: Especificacions de la carcassa.

n _{ps}	Nº baffles	Distància entre bafles (mm)
2	14	76,2

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.4.3.90: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v _s (m/s)	v _t (m/s)
5,44	1,09

11.9.4.4. Condensador C-502

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.4.4.91: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 54		Oli tèrmic chiller	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	438		4961	
Temperatura (°C)	56,22	25,12	-44	-34

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.4.4.92: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m²)	U (W/m²K)
0,5	211,3

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.4.4.93: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{pt}	N_t
19,05	800	2	12

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.4.4.94: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D_s (mm)	L/D_s
141,3	5,66

Pel que comporta a les característiques geomètriques de la carcassa, donat que es tracta d'un bescanviador tipus BEM, només té un pas per carcassa:

Taula 11.9.4.4.95: Especificacions de la carcassa.

n_{ps}	Nº baffles	Distància entre baffles (mm)
2	7	158,75

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació que es troben dins del rang, ja que tots dos fluids es troben en fase líquida:

Taula 11.9.4.4.96: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
9,26	1,3

11.9.5. Reboilers

Per tal d'evaporar el líquid que baixa per les columnes, s'empren calderins (kettle), on s'escalfa el fluid amb oli tèrmic, el qual ha sigut escalfat prèviament en la caldera. L'evaporació es dona en el costat de la carcassa en tots el casos. Al ser un calderí no hi haurà bafles, per tant no s'especifiquen les característiques geomètriques de la carcassa.

11.9.5.1. Reboiler RB-301

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.5.1.97: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 13		Oli tèrmic caldera	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	20290		90000	
Temperatura (°C)	85,48	87,19	175	128,19

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.5.1.98: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
37,3	824

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.5.1.99: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
19,05	2550	2	117

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.5.1.100: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
457,2	5,58

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació:

Taula 11.9.5.1.5: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
3,82	1,49

11.9.5.2. Reboiler RB -302

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.5.2.101: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 35		Oli tèrmic caldera	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	10590		20000	
Temperatura (°C)	33,25	33,02	128,19	103,07

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.5.2.102: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
4,9	740,7

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.5.2.103: Especificacions dels tubs.

D_E (mm)	L (mm)	n_{Pt}	N_t
19,05	1219,2	2	32

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.5.2.104: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D_s (mm)	L/D_s
273,05	4,47

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació:

Taula 11.9.5.2.5: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v_s (m/s)	v_t (m/s)
-------------	-------------

0,81	1,14
------	------

11.9.5.3. Reboiler RB -501

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.5.3.105: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 49		Oli tèrmic caldera	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	3497		5000	
Temperatura (°C)	54,74	100,47	175	137,05

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.5.3.106: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
4,9	477,5

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.5.3.107: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
19,05	1300	6	29

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.5.3.108: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
273,05	4,76

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació:

Taula 11.9.5.3.5: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v _s (m/s)	v _t (m/s)
0,78	1

11.9.5.4. Reboiler RB -502

Les especificacions dels corrents d'entrada i sortida són les següents:

Taula 11.9.5.4.109: Corrents i condicions d'aquests a l'entrada i a la sortida.

	Corrent 56		Oli tèrmic caldera	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
Cabal (kg/h)	1763		3000	
Temperatura (°C)	139	140	175	163,16

Aquests valors determinaran uns requeriments energètics, els quals vindran marcats per l'àrea de bescanvi necessària i el coeficient global de transferència de calor; s'obté:

Taula 11.9.5.4.110: Àrea de bescanvi i coeficient global.

Àrea (m ²)	U (W/m ² K)
0,5	522

S'escull les dimensions i el número de passos dels tubs, en aquest cas de tipus pla, el que determinarà el número de tubs necessaris per assolir l'àrea de bescanvi:

Taula 11.9.5.4.111: Especificacions dels tubs.

D _E (mm)	L (mm)	n _{Pt}	N _t
19,05	680,8	6	6

Les especificacions dels tubs marcaran el diàmetre de la carcassa, podent comprovar que la relació L/D_s es troba entre 4 i 6:

Taula 11.9.5.4.112: Diàmetre de la carcassa i relació d'aquest amb la longitud.

D _s (mm)	L/D _s
168,28	4,05

Amb tots aquests paràmetres s'obtenen unes velocitats de circulació:

Taula 11.9.5.4.5: Velocitats de circulació als dos costats del bescanviador.

v _s (m/s)	v _t (m/s)
0,31	1

11.9.6. Aïllament dels bescanviadors

Per últim, s'hauran d'aïllar els bescanviadors, tant per la seguretat dels operaris de la planta com per evitar pèrdues de calor. L'espessor del aïllant es calcula en funció de la temperatura més extrema del fluid que circula per la carcassa. S'utilitza llana mineral de roca, d'una densitat de 80kg/m^3 per a aïllar els bescanviadors amb temperatures positives i poliuretà per aïllar els bescanviadors amb temperatures negatives.

Taula 11.9.6.1: Espessor necessari per aïllar cada bescanviador, reboiler i condensador.

Bescanviador	T carcassa (°C)	Espessor aïllant (")	Espessor aïllant (mm)
E-201	128,19	1,5	38,1
E-202	99,89	1,03	26,2
E-203	128,19	1,5	38,1
E-204	90	0,88	22,4
E-205	-15	2,76	70,1
E-206	32,71	-	-
E-301	95,87	0,97	24,6
E-302	61,36	0,47	11,9
E-401	125	1,44	36,6
E-402	125	1,44	36,6
E-403	120,8	1,37	34,8
E-404	-44	3,30	83,8
E-501	99,89	1,03	26,2
C-301	-28,54	2,90	73,7
C-302	-38,2	3,15	18,0
C-501	-35,27	3,15	80,0
C-502	56,22	0,4	10,2
RB-301	87,12	0,84	21,3
RB-302	33,25	-	-
RB-501	100,47	1,04	26,4
RB-502	140	1,69	42,9

11.10. Disseny de compressors

En el procés de producció s'utilitzen dos compressors per tal d'impulsar els corrents gasosos, un a la sortida del reactor R-401 per arribar a la pressió de treball a la destil·lació CD-501 i l'altre per impulsar l'aire atmosfèric per a la absorció del clorur d'hidrogen de sortida de la columna CD-302 en aigua; s'escollirà el tipus de compressor segons la pressió que requereix a la sortida. S'ha de dir que contra més es comprimeixi el gas, la temperatura a la sortida del compressor serà major. Per tal de calcular la potència necessària a aportar al motor del compressor, es calcula a partir de la següent equació:

$$\widehat{W} = \int_{P_1}^{P_2} v \cdot dP$$

On:

v = viscositat cinemàtica

P = pressió

El seu càlcul variarà segons el cas requerit, per tant s'ha de calcular la raó de compressió que es calcula a partir de la relació entre pressions d'entrada i sortida al compressor (P_2/P_1). Els tipus de compressor que trobem a les indústries són els següents:

- VENTILADORS:

S'utilitzen per a cabals de procés baixos i de pressions baixes, fins a una relació de pressions P_2/P_1 de 1,2 atmosferes. En aquest cas, la variació de pressió és tant baixa que es considera que no hi ha variació de densitat en el gas, de manera que es pot calcular la potència de la manera següent:

$$\widehat{W} = \int_{P_1}^{P_2} v \cdot dP = \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{\rho} = \Delta P / \rho$$

$$W = m \cdot \Delta P / \rho = Q_L \cdot \Delta P$$

- BUFADORS:

En aquest cas, s'utilitza per a cabals i pressions entremitjos, amb una relació P_2/P_1 entre 1,2-3 atmosferes. En aquest cas no es considera que la densitat no és constant:

$$P \cdot v = \frac{zRT}{M}$$

$$\hat{W} = \frac{zRT}{M} \cdot \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = \frac{zRT}{M} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

On:

z = factor de compressibilitat

M = pes molecular

En aquest cas P·v = constant.

$$\hat{W} = P_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

- COMPRESSORS:

En aquest cas s'utilitzen per a tractament de cabals alts i amb una relació de pressions elevades, majors a 3 atmosferes. La potència es calcula a partir de la següent equació:

$$w = N \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{zRT_0}{PM} \cdot \left[\left(\frac{P_N}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{N\gamma}} - 1 \right]$$

On:

W = potència del compressor (KJ/Kg)

z = factor de compressibilitat

M = pes molecular

Y = eficàcia de compressió (Cp/Cv)

N = número d'etapes del compressor

P2/P1 = relació de compressió

A continuació es mostren les equacions per al càlcul de la potència real i la variació de temperatura en el compressor:

$$P = \frac{W \cdot m}{\eta}$$

On:

W = potència del compressor (KJ/Kg)

m = cabal màssic (Kg/s)

η = eficàcia de compressor

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

On:

T_1 = temperatura de entrada al compressor (°C)

T_2 = temperatura de sortida al compressor (°C)

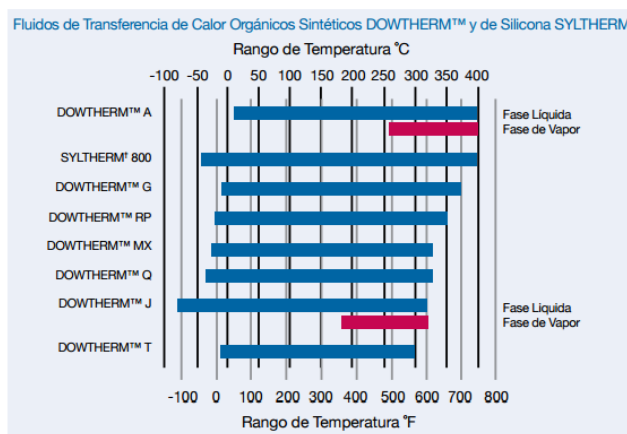
11.11. Especificacions i necessitats de serveis de planta

Es requereix un sistema on la possibilitat de contaminació del procés amb aigua sigui mínima, ja que el contacte amb aigua de certs components suposaria un greu perill, degut a les reaccions exotèrmiques que es donarien, per tant el procés ha de ser del tot anhidre.

11.11.1. Chiller d'oli tèrmic

El fluid refrigerant que ha sigut utilitzat per a refredar els equips és el mateix fluid tèrmic emprat en l'escalfament, el DOWTHERM-J. S'ha optat per aquest fluid tèrmic, degut al rang de temperatures en el que es pot operar; ens permet treballar a unes temperatures dels -75 °C fins al 185°C, com podem demostrar en la següent taula:

Taula 11.11.1.1: Rangs de temperatures de treball de diferents refrigerants



La temperatura més baixa requerida en el nostre procés és de -44 °C; de manera que necessitem un chiller que treballi com a mínim a una temperatura al voltant de -50 °C; per tal de que es compleixi aquesta condició, s'escull com a fluid de chiller l'amoníac.

A més, s'ha de dir que el DOWTHERM-J no té cap derivat del glicol, ja que és una mescla d'isòmers d'aromàtics alcalins; d'aquesta manera, per raons de seguretat es fa que el refredament entre l'amoníac i el fluid tèrmic es doni en un circuit extern al chiller, mitjançant un bescanviador.

En el nostre procés, els equips es refrigeren a partir d'una sola temperatura, que ha sigut esmentada anteriorment (-44 °C), aquesta es divideix en els diferents corrents de fred per distribuir-se als diferents equips que componen la planta de producció. Seguidament, es mostra un esquema sobre el funcionament del servei de chiller:

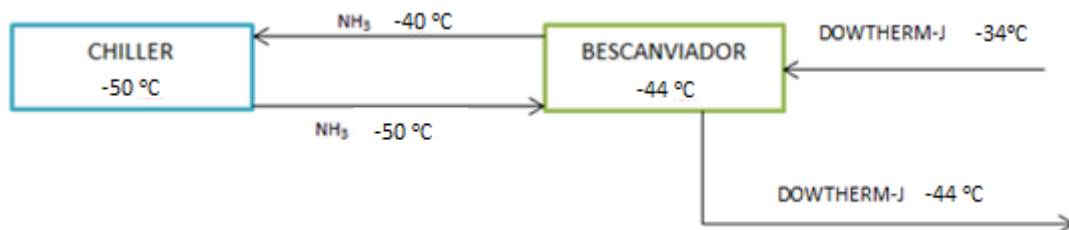


Figura 11.11.1.1. Esquema del funcionament del servei del chiller i el bescanviador

Després d’haver mostrat el funcionament del servei de chiller, cal saber el cabal d’amoniac necessari per refrigerar l’oli tèrmic utilitzat al procés; per tal de saber-ho, primerament, es determina el cabal total d’entrada d’oli tèrmic (DOWTHERM-J) que cal refredar. Del chiller surt un únic corrent d’oli tèrmic a -44°C, el qual es divideix en els diferents corrents que arriben als bescanviadors; una vegada l’oli ha refredat el fluid pertinent, es junta en una canonada de retorn cap al chiller, per tal de tenir un únic circuit tancat del sistema de refrigeració, prenent una temperatura final de -34°C:

Taula 11.11.1.2. Entrada al bescanviador de servei de chiller amb els seus respectius cabals

Entrada bescanviador (-34°C)	
Referència	Cabal (Kg/s)
CONDENSAT CD-301	37,40
CONDENSAT CD-302	14,85
CONDENSAT CD-501	9,03
CONDENSAT CD-502	1,38
VAPOR R-201	4,07
ENTRADA CD-501	5,77
TOTAL	72,49

Taula 11.11.1.3. Sortida al bescanviador de servei de chiller amb els seus respectius cabals distribuïts als equips corresponents

Sortida bescanviador (-44°C)	
Referència	Cabal (Kg/s)
CONDENSAT CD-301	37,40
CONDENSAT CD-302	14,85
CONDENSAT CD-501	9,03
CONDENSAT CD-502	1,38
VAPOR R-201	4,07
ENTRADA CD-501	5,77
TOTAL	72,49

Amb el cabal total a refrigerar d’oli tèrmic, és possible calcular el cabal necessari d’amoniac per tal de refredar el DOWTHERM-J de -34 °C a -44 °C.

$$CABAL\ TOTAL = 72,49\ Kg/s \rightarrow CABAL\ NH_3\ NECESSARI = 22,25\ Kg/s$$

Un cop es té el valor del cabal de servei d'amoniac, es pot calcular la seva potència per tal de poder escollir una caldera comercial que sigui capaç de proporcionar-la. El càlcul de la potència del chiller ve determinat per la següent equació:

$$Q = M_t \cdot C_p \cdot \Delta T$$

On:

Q = potència necessària a subministrar al chiller (KW)

M_t = Cabal màssic d'amoniac al chiller (22,25 Kg/s)

C_p = capacitat específica de l'amoniac a $T = -50\ ^\circ C$ (1,96 KJ/Kg·°C)

ΔT = diferència de temperatura entre l'entrada i sortida del chiller (10 °C)

La potència calculada es multiplica per un 3% de sobre dimensionament, d'aquesta manera hem obtingut un total de potència de:

$$Q = 436,2\ KW$$

Per tal de subministrar la potència requerida, s'escull com a chiller de treball el REYNOLD INDUSTRIAL CASCADE CHILLER.



Figura 11.11.1.2. REYNOLD INDUSTRIAL CASCADE CHILLER

Aquest equip permet treballar a una potència d'entre 4-753 KW, per tant, és més que suficient per al subministrament del servei de la planta, a més permet treballar a unes temperatures de fins a -55 °C. D'altra banda, té com a avantatges:

- Alta fiabilitat dels compressors d'èmbol d'Europa.
- Vàlvules d'expansió electròniques per a una major eficiència i control precís de la temperatura.
- Favorable per al medi ambient.
- Proporciona unitats de PLC's totalment automàtics amb control remot i amb facilitat de registre de dades.

A continuació es calcula el número de chillers necessaris:

$$N^{\circ} \text{ chillers} = Q / Q_{\text{chiller}}$$

On:

Q= potència calculada necessària a subministrar pel chiller (436,2 KW x 1,03 = 449,2 KW)

Q_{chiller}= potència del chiller seleccionada del catàleg (753 KW)

$$N^{\circ} \text{ chillers} = 1$$

Seguidament, es calcula en percentatge la potència a la qual treballa el chiller:

$$W(\%) = \frac{Q / N_{ch}}{Q_{ch}} = 60\%$$

Per tant, per a un chiller de 449,2 KW la potència de treball seria del 60%, en aquest cas, es pren la decisió d'instal·lar dos chillers en l'àrea de serveis, perquè així en el cas de que un dels chillers s'espatlli, es podria continuar treballant amb l'altre sense cap problema.

També s'ha de dir que, per motius operacionals s'aniran alternant el seu funcionament, per tal d'assegurar que els dos chillers treballen correctament. Per tant, cada dos mesos es deixarà de treballar amb el chiller que ha estat en funcionament els dos mesos anteriors i es posarà en marxa l'altre.

11.11.2. Caldera d'oli tèrmic

L'oli tèrmic escollit és el DOWTHERM-J, com ja s'ha esmentat abans, gràcies a que ens permet treballar fins a temperatures força elevades, on aquest compost no canvia a fase vapor fins als 180 °C (mirar Taula 11.5.1.1) . Aquest tipus de fluid exhibeix una estabilitat tèrmica elevada i una millora de bombabilitat a temperatura més baixa.

La temperatura requerida per escalfar el procés de producció del FREON-13 arriba fins a 175 °C, per tant es requereix una caldera per a que aquest oli s'escalfi contínuament, una vegada hagi sortit dels diferents equips. Per tant, quan l'oli tèrmic hagi escalfat els diferents equips de procés, es necessitarà d'aquesta caldera per a tornar a escalfar el calefactor i aconseguir un circuit tancat d'aquest.

En el procés, els equips s'escalfen a partir d'una sola temperatura, que ha sigut esmentada anteriorment (175 °C), aquest corrent principal es divideix en els diferents corrents de calent per distribuir-se als diferents equips que componen la planta de producció. Seguidament, es mostren les propietats principals del DOWTHERM-J:

Taula 11.11.2.1. Propietats típiques del líquid de DOWTHERM-J

Property	English Units	SI Units
Freeze Point	 <-100°F	 <-81°C
Boiling Point	 358°F	 181°C
Flash Point ¹	 136°F	 57°C
Fire Point ²	 140°F	 60°C
Autoignition Temperature ³	 788°F	 420°C
Density @ 60°F	 54.13 lb/ft ³	
	 7.25 lb/gal	 860 kg/m ³ @ 25°C
Surface Tension in Air	 28 Dynes/cm @ 77°F	
Estimated Critical Constants:		
T _C	 721°F	 383°C
P _C	 28 Atm	 28.4 bar
V _C	0585 ft ³ /lb	 3.65 l/kg
Average Molecular Weight	 134	
Heat of Combustion	 17,800 Btu/lb	 41,400 kJ/kg

Una vegada es coneixen les propietats físiques i químiques del oli tèrmic, es plantegen els cabals que es requereix d'oli tèrmic per escalfar tot el procés productiu:

Taula 11.11.2.2. Entrada a la caldera d'oli tèrmic amb els seus respectius cabals

Referència	Cabals (Kg/s)
REBOILER CD-301	16,67
REBOILER CD-302	5,56
REBOILER CD-501	1,39
REBOILER CD-502	0,83
HF aliment	1,39
R-201	11,11
TOTAL	36,94

Un cop es sap el valor del cabal de servei d'oli tèrmic, es pot calcular el calor a bescanviar, per tal de poder escollir una caldera comercial que sigui capaç de proporcionar-ne la potència necessària. El càlcul de la potència de la caldera de vapor ve determinat per la següent equació:

$$Q = M_t \cdot C_p \cdot \Delta T$$

On:

Q = potència necessària a subministrar a la caldera (KW)

M_t = Cabal màssic d'oli tèrmic (36,94 Kg/s)

C_p = capacitat específica mitjana del DOWTHERM-J entre $T = 175-135$ °C (2,26 KJ/Kg.°C)

ΔT = diferència de temperatura entre l'entrada i sortida de la caldera (39,9 °C)

La potència calculada es multiplica per un 3% de sobre dimensionament, d'aquesta manera s'obté una potència de:

$$Q = 3436,0 \text{ KW}$$

Per tal de subministrar la potència necessària s'escull una caldera d'oli tèrmic de l'empresa *Babcock Wanson España S.A.*



Calderas de aceite térmico – serie EPC-H

serie EPC-H desde 2.000.000 hasta 12.000.000 kcal/h (2.326 hasta 13.953 kW)

TiPos	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	10000	12000
Capacidad neta (kW)	2.326	3.488	4.651	5.814	6.977	8.140	9.302	11.628	13.953
Contenido de aceite (L)	1.060	1.250	1.700	1.950	2.250	3.650	4.400	5.500	6.600

Figura 11.11.2.1. Calderes de la series EPC-H

Segons el requeriment obtingut en la caldera, s'ha escollit una caldera EPC-H 4000 ja que permet treballar a una potència similar a la potència calculada. Seguidament es mostra com és la caldera subministrada pel fabricant i les seves mesures:

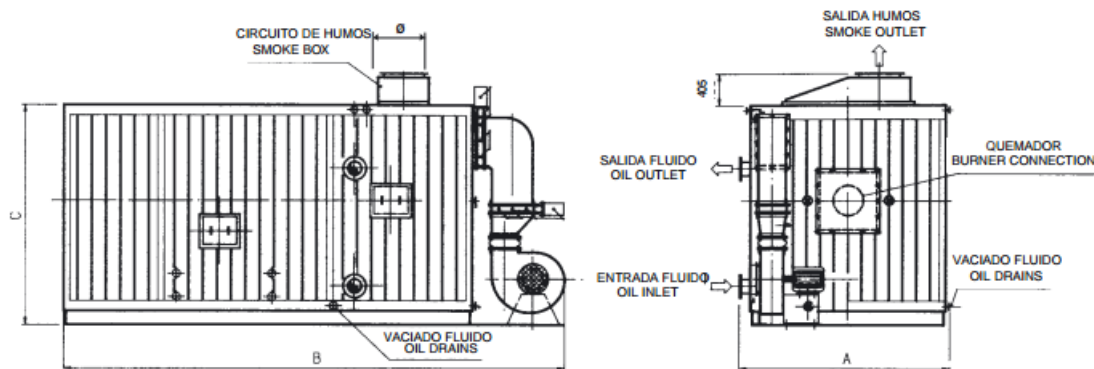


Figura 11.11.2.2. Caldera EPC-H 4000

On:

A = amplada de la caldera

B = llargada de la caldera

C = altura de la caldera

Taula 11.11.2.3. Dimensions de la caldera EPC-H 4000

A (metres)	2,7
B (metres)	6,9
C (metres)	2,8

Una vegada especificats les dimensions de les calderes, s'especifiquen els paràmetres de disseny principals que defineixen la caldera EPC-H 4000:

EPC - H	mod.	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	10000	12000
Potencia tèrmica Net capacity	kCal/hx1000 kw.	2000 2326	3000 3488	4000 4651	5000 5814	6000 6977	7000 8140	8000 9302	10000 11628	12000 13953
Peso en vacío Empty weight	kg.	9000	13000	15000	17000	21000	23000	24000	30000	34000
Contenido de fluido Oil content	l.	1060	1250	1700	1950	2250	3650	4400	5500	6600
Caudal fluido Circulated oil	mc/h.	120	150	200	222	240	280	320	400	400
ΔT. fluido ΔT. oil	°C	33	40	40	45	50	50	50	50	60
ΔP. fluido ΔP. oil	m.c.l.	11	18	19	20	19	18	21	26	25
Ancho- Width A	mm.	2368	2472	2668	2768	3096	3268	3268	3668	3668
Largo- Length B	mm.	5744	6557	6921	7191	7391	8450	9058	9595	9595
Alto- Height C	mm.	2413	2543	2795	2901	3216	3462	3512	3797	4091
Ø Chimenea - Chimney	mm.	350	400	500	550	600	700	700	800	900

Taula 11.11.2.4. Paràmetres principals de les calderes EPC-H

Aquests tipus de calderes EPC-H es caracteritzen per:

- Caldera de fluid tèrmic horitzontal multi tubular d'alt rendiment, sèrie EPC-H. D'estructura paral·lelepípede, composta d'una sèrie de tubs en paral·lel connectats als col·lectors.
- La cambra de combustió és de gran volum, amb poca càrrega tèrmica i amb un flux tèrmic superficial reduït, i tancada per tubs tangents.
- Els cremadors estan previstos per polvoritzadors de tipus mecànic, de vapor o pneumàtics per a combustibles líquids i d'aire insuflat per a combustibles gasosos i mixtes.
- El reescalfador d'aire de la EPCH es caracteritza pel seu òptim dimensionament de les superfícies d'intercanvi tèrmic fums-aire i per un alt rendiment tèrmic.
- Eficàcia tèrmica del 92%, obtinguda de les superfícies d'intercanvi i gràcies al preescalfament d'aire comburent.

A continuació es calcula el número de calderes necessàries:

$$N^{\circ} \text{ calderes} = Q / Q_{\text{caldera}}$$

On:

Q= potència calculada necessària a subministrar a la caldera (3436 KW)

Q_{caldera}= potencia de la caldera seleccionada del catàleg (4651 KW)

$$N^{\circ} \text{ calderes} = 1$$

Seguidament es calcula en percentatge la potència a la qual treballa la caldera:

$$W(\%) = \frac{Q / N_{\text{cal}}}{Q_{\text{caldera}}} = 74\%$$

Per a una caldera de 3565 KW s'estaria treballant a una potència del 74%, per tant es situa com una potència de treball recomanada per les calderes, ja que no poden treballar a més del 80% de la seva capacitat. En aquest cas, es pren la decisió d'instal·lar dues calderes en l'àrea de serveis, perquè així en el cas de que una de les calderes s'espatlli, es podria continuar treballant amb l'altre sense cap problema.

Ara es calcula les necessitats energètiques de la caldera. El combustible que s'utilitza és el gas natural.

$$Cabal_{gas} = \frac{Q}{PCI \cdot \varphi}$$

On:

PCI = poder calorífic inferior del gas natural (41800 KJ/m³)

φ = la eficiència (0,8)

Q= la potència calculada (3565 kW)

Per tant el cabal de gas obtingut per la caldera escollida és de:

$$Cabal_{gas} = 0,11 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{3600 s}{1 h} = 399,6 m^3/h$$

11.11.3. Torre de refrigeració

Donada la necessitat de refrigerar amb un fluid que treballi en un rang de temperatures més neutre i la impossibilitat d'emprar aigua com a fluid refrigerant, s'ha optat per utilitzar una torre de refrigeració de cicle tancat, en la qual es refredarà el mateix oli tèrmic que en les calderes i en el chiller, però mitjançant el contacte indirecte amb aigua.

Aquest tipus de torre de refrigeració es caracteritza per que el fluid a refrigerar no entra en contacte directe amb l'atmosfera, el que comporta que aquest no es contaminei. L'oli tèrmic es fa passar per dins d'un serpentí, a mode de bescanviador de calor, situat dins la torre de refrigeració, es polvoritza aigua des de la part superior, a la vegada que es fa circular aire de manera forçada en contracorrent a través del serpentí; d'aquesta manera, s'aconsegueix que part de l'aigua s'evapori, absorbint així, calor del fluid que circula per dins dels tubs. L'aigua sobrant, cau a la safata de la part inferior i és bombejada de nou cap els polvoritzadors. A continuació, es pot observar l'estructura d'una torre de refrigeració de circuit tancat:

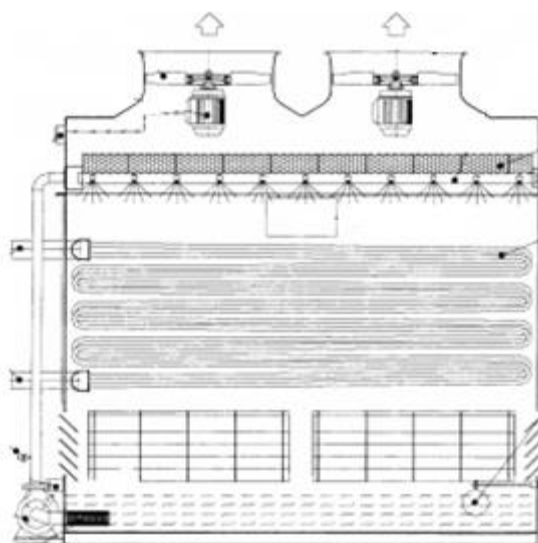


Figura 11.11.3.1: Estructura interna d'una torre de refrigeració de circuit tancat.

Es treballa amb una torre de refrigeració d'on surt tot el oli tèrmic que es troba a temperatura moderada de la planta, el qual es distribueix en diferents corrents que arriben als equips pertinents, per després tornar-se a unir en un sol corrent de retorn cap a la torre.

S'ha decidit emprar aigua descalcificada, degut a la gran importància que té la qualitat de l'aigua en el procés, tant per la vida útil de l'equip, com per l'eficiència a l'hora de transferir el calor.

Primerament, s'ha de calcular el calor que s'haurà de dissipar, per tal de refredar l'oli fins a la temperatura a la que aquest entra als equips. Es defineix un salt tèrmic de 10°C, és a dir, l'oli tèrmic surt de la torre a 29°C i torna a 39°C. A continuació, es troben definits els diferents corrents en que es divideix l'oli:

Taula 11.11.3.1: Cabals d'oli tèrmic procedent de la torre de refrigeració.

Referència	Cabal (Kg/s)
Líquid R-201	0,28
Vapor R-201	4,17
Aigua absorció	34,72
Sortida R-401	6,67
HClcomercial	6,02
R-401	11,99
TOTAL	63,85

A partir del corrent total, del salt tèrmic establert i la mitjana del calor específic pel rang de temperatures, es calcula el calor a transferir:

$$Q = M_t \cdot C_p \cdot \Delta T$$

On:

Q= calor bescanviat (KW)

M_t = Cabal màssic d'oli tèrmic (63,85 Kg/s)

C_p = capacitat específica mitjana del DOWTHERM-J entre T= 29-39°C (1,875 KJ/Kg·°C)

ΔT = diferència de temperatura entre l'entrada i sortida de la torre (-10 °C)

$$Q = -1196,87 \text{ KW}$$

Els requeriments d'aigua es calcularan a partir de la mateixa equació, però aïllant en aquest cas, el cabal màssic. El calor a bescanviar serà igual al cedit per l'oli tèrmic, però canviat de signe. D'altra banda, s'estableix un salt tèrmic de l'aigua de 6°C, aquesta entrarà a 27°C i sortirà a 33°C; per últim, el calor específic serà el valor mig del calor específic de l'aigua en el rang de temperatures en les que es troba, substituint s'obté:

$$M_{aigua} = \frac{1196,87 \text{ kJ/s}}{4,1785 \frac{\text{kJ}}{\text{Kkg}} \cdot (33 - 27) \text{ K}} = 47,74 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 171848,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{circulació} = M_{aigua} \cdot \rho = 171848,3 \text{ L/h}$$

Del cabal d'aigua que circula per dins la torre, n'hi haurà una part que s'evaporarà, una altra que serà arrossegada i una altra que caurà a la safata inferior, i per tant, es tornarà a bombejar cap a la part superior. Donat que el cabal d'aigua ha de ser constant en tot moment, haurà d'haver-hi un cabal d'entrada d'aigua de reposició, per tal de compensar les pèrdues ocasionades en l'evaporació, l'arrossegament i la purga:

-Cabal d'aigua arrossegat. En torres de refrigeració les pèrdues per arrossegament acostumen a estar per sota del 0,02% del cabal de circulació. Per tant:

$$Q_{arrossegat} = \frac{0,02}{100} \cdot Q_{circulació} = \frac{0,02}{100} \cdot 171848,3 \frac{\text{L}}{\text{h}} = 34,37 \text{ L/h}$$

-Cabal d'aigua evaporat, es pot fer un càlcul aproximat amb:

$$Q_{evaporat} = \frac{c_p \cdot Q_{circulació} \cdot \Delta T}{\lambda}$$

On: λ és el calor latent mitjà de l'aigua pel rang de temperatures (2256 kJ/kg)

C_p és el calor específic mitjà de l'aigua entre 27 i 33°C (4,223 kJ/kg°C)

$$Q_{evaporat} = \frac{4,223 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot 171848,3 \frac{\text{L}}{\text{h}} \cdot (33 - 27)^\circ\text{C}}{2256 \text{ kJ/kg}} = 1930,1 \text{ L/h}$$

-Cabal d'aigua de purga. En torres de refrigeració s'acostuma a extreure un corrent de purga, per tal d'evitar l'acumulació dels sòlids. Donat que s'ha decidit utilitzar aigua descalcificada en el circuit, no serà necessària aquesta purga, ja que teòricament l'aigua emprada estarà lliure de sòlids.

Així doncs, el cabal de reposició haurà de ser:

$$Q_{reposició} = Q_{arrossegat} + Q_{evaporat} = 34,37 \text{ L/h} + 1930,1 \text{ L/h} = 1964,46 \text{ L/h}$$

El rendiment d'una torre, depèn, principalment, d'una bona distribució de l'aigua, de la quantitat d'aire aspirat i de la temperatura exterior. Donat que la temperatura exterior varia en funció de l'època de l'any, s'escull una torre de refrigeració que estigui sobredimensionada i

amb la qual només sigui necessari operar amb un sol equip, però assegurant-ne, que l'oli tèrmic es refredarà fins a la temperatura necessària independentment de les condicions climatològiques.

Per l'elecció de la torre de refrigeració s'empren les dades climatològiques mitjanes de Sabadell pel mes de Juliol, ja que és el mes més calorós del any, i per tant, el més desfavorable.

La temperatura seca mitjana és: 23,8°C

La humitat relativa mitjana és: 67%

Amb aquests dos valors és possible determinar la temperatura de bulb humit situant-los en el diagrama psicromètric:

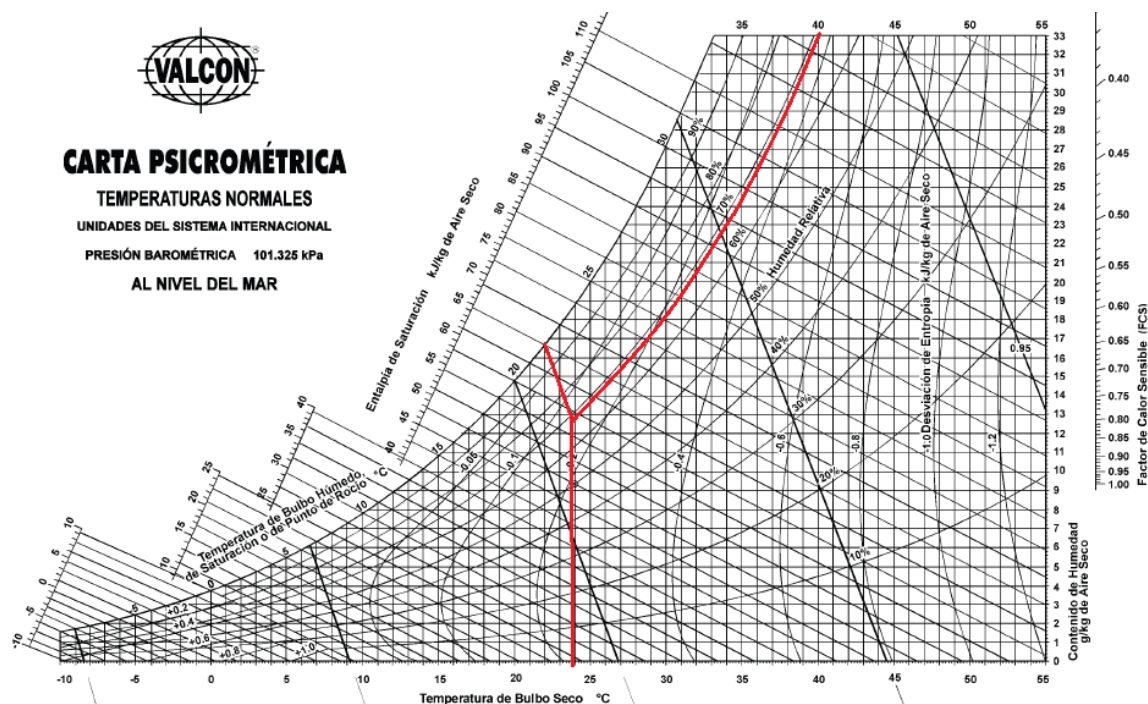


Figura 11.11.3.2: Diagrama psicromètric, relació entre temperatura seca i humitat relativa.

Com s'observa, la temperatura humida obtinguda per les condicions climatològiques és de 22°C. Amb el salt tèrmic establert anteriorment per l'aigua, i calculant la temperatura d'apropament (diferència entre la temperatura de sortida de l'aigua i la mesurada amb termòmetre humit), es determina gràficament el factor de funcionament de la torre:

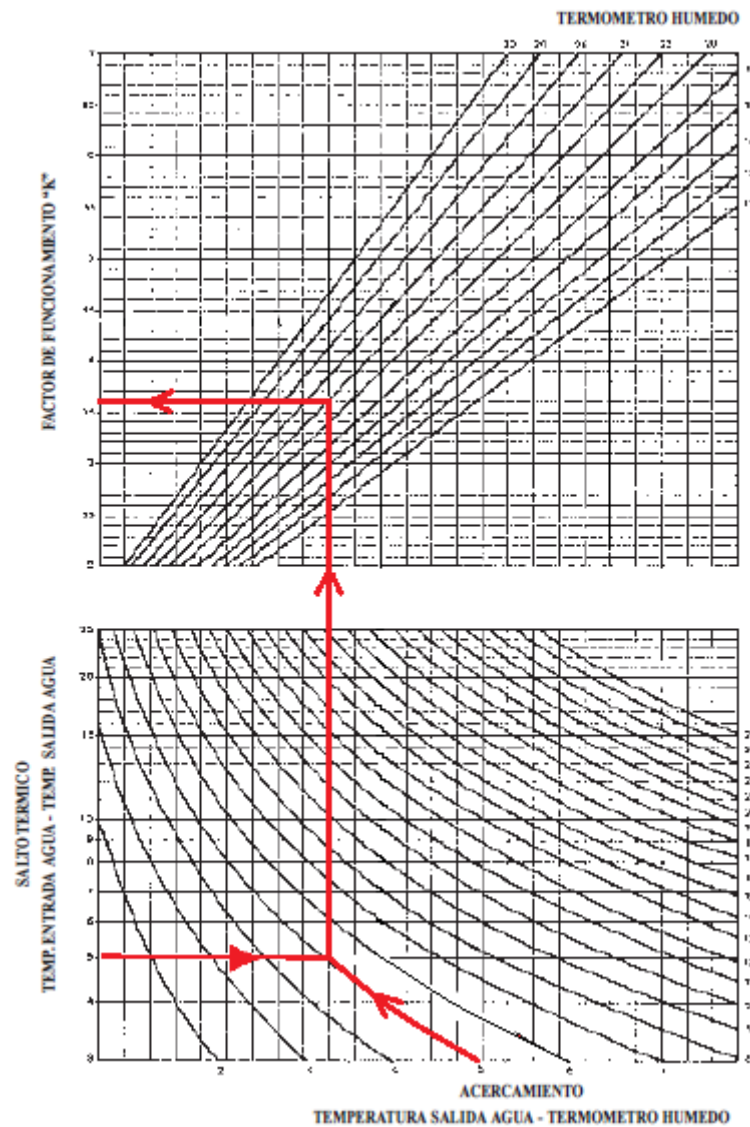


Figura 11.11.3.3: Gràfic per determinar "K".

A partir del factor de funcionament obtingut ($K=3,6$), es calcula el índex de selecció (S):

$$S = \frac{Q_{\text{circulació}}}{K} = \frac{171,8483 \text{ m}^3/\text{h}}{3,6} = 47,74$$

Finalment, es determina el model de torre de refrigeració, seleccionant el model que tingui el índex de selecció obtingut en excés:

Taula 11.11.3.2: Índex de selecció de diferents models de torres de refrigeració de circuit tancat.

Torres de Circuito Cerrado	
"S" = Caudal de agua m³/h ÷ "K"	
Torres tipo EWK-C	Índice "S"
EWK-C 144/2	0,7
EWK-C 144/3	1
EWK-C 144/4	2
EWK-C 225/3	4
EWK-C 225/4	5
EWK-C 225/5	6
EWK-C 324/3	6,5
EWK-C 324/4	7
EWK-C 324/5	8
EWK-C 441/3	8,5
EWK-C 441/4	9
EWK-C 441/5	11
EWK-C 441/6	15
EWK-C 576/3	15,3
EWK-C 576/4	15,6
EWK-C 576/5	16
EWK-C 576/6	17
EWK-C 900/3	18
EWK-C 900/4	20
EWK-C 900/5	22,5
EWK-C 900/6	25
EWK-C 1260/3	27
EWK-C 1260/4	30
EWK-C 1260/5	34
EWK-C 1260/6	40,5
EWK-C 1800/3	41,5
EWK-C 1800/4	42,5
EWK-C 1800/5	46
EWK-C 1800/6	53

S'escull l'equip EWK-C 1800/6, el qual té un índex de selecció de 53, el que podrà donar un cabal d'aigua de:

$$Q_{capacitat\ aigua} = 53 \cdot 3,6 = 190,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

Comparant amb el cabal que es necessita d'aigua per refredar l'oli tèrmic:

$$\frac{190,8 \text{ m}^3/\text{h} - 171,8483 \text{ m}^3/\text{h}}{190,8 \text{ m}^3/\text{h}} \cdot 100 = 9,93\%$$

Per últim, es mostren les característiques de l'equip:

Taula 11.11.3.3: Característiques de la torre seleccionada.

Ventilador Potència Motor KW	Bomba Recirculació Motor KW	Pes buit (kg)	Pes en servei (kg)	Dimensions (mm)						
				A	B	C	D	E	F	G
22,0	2x4,0	10200	23820	4590	4100	4100	1160	660	6X3"	6x3"

Es posaran dos equips per duplicat, per tal de poder fer un manteniment sense haver de parar el procés de producció, i per prevenir possibles averies. Cada equip estarà en funcionament per períodes alterns de dos mesos, el que suposarà un desgast menor per l'equip, i per tant, un augment de la vida útil.

11.11.4. Aire comprimit

Per tal de subministrar aire a la planta de producció es farà ús d'un compressor que enviarà aire comprimit a les vàlvules que requereixen.

En la planta hi ha un total de 50 vàlvules de control, com que totes les vàlvules no es troben en funcionament en un temps determinat, es suposa que hi han només un 60% d'aquestes en funcionament. A més, cada vàlvula treballa amb un cabal de 1m³/h a una pressió total de 4,5 bars. Per tal de calcular la potència del compressor es requereix la següent equació:

$$POTÈNCIA (HP) = 0,0044 \cdot P_1 \cdot Q_1 \cdot \ln\left(\frac{P_2}{Q_2}\right)$$

On:

P₁ = Pressió al compressor (lb/polzada²).

Q₁ = Cabal d'aire al compressor (ft³/min).

P₂ = Pressió a la vàlvula (lb/polzada²).

Q₂ = Cabal d'aire requerit a la vàlvula (ft³/min).

Es suposa un cabal de 1 m³/h que necessiten cada vàlvula de control a una pressió de treball de 2 bars.

$$\text{Cabal aire total} \left(\frac{m^3}{h} \right) = 1 \frac{m^3}{h} \cdot (0,6 \cdot 50) = 30 \frac{m^3}{h}$$

$$POTÈNCIA (HP) = 0,0044 \cdot 65,27 \cdot 17,7 \cdot \ln\left(\frac{29,01}{0,59}\right) = 19,8 HP = \mathbf{14,8 kW}$$

A partir de la potencia calculada, es busca un compressor d'aire comprimit que ens aporti com a mínim aquesta potencia. El que s'ha escollit el compressor de la Serie Optima que subministra l'Empresa ECenercontrol, S.L.

■ Compresor de aire, SERIE OPTIMA de 30 a 90 kW

Modelo OPTIMA		m3/min	Kw	Bar
	Optima 35	5,1	30	5 - 10,5
	Optima 45	7,35 / 6	45	7 / 10
	Optima 75	12,9 / 10,5	75	7 / 10
	Optima 90	16 / 12,5	90	7 / 10

Figura 11.11.4.1: Característiques de compressors de l'empresa ECenercontrol S.L.

S'escull Optima 35 que proporciona una potencia de 30 KW. Per raons de seguretat de la planta, es decideix doblar en compressor de servei d'aire comprimit, per tant, el ús d'aquestes compressors s'anirà alternat.

11.11.5. Nitrogen per a blanketing

El nitrogen s'utilitza per a mantenir la pressió en els diferents equips, en el cas de la planta, s'ha de tenir en compte els tancs d'emmagatzematge, tancs pulmons i tanc de mescla,

En el cas dels tancs d'emmagatzematge, requereixen el subministrament de nitrogen degut a les variacions de pressió a dins dels equips degut a l'ompliment i buidatge d'aquest; per al càlcul necessari de nitrogen en els tancs d'emmagatzematge, es sumaran els volums de cada compost, en aquest cas es calculen que es requeriran aproximadament uns 400 m³, per tant es requerirà un total de 500 Kg. El càlcul del cabal de nitrogen necessari es dona com a punt base un temps de 10 dies com a mínim per tal de mantenir la pressió dels tancs; per tant s'obté un cabal de nitrogen total de 2,1 Kg/h.

Per als tancs pulmons i el tanc de mescla s'obté un volum de nitrogen de 31,5 m³, per tant requereixen uns 40 Kg de nitrogen. Per tal de disposar del nitrogen necessari es contracta l'empresa de "Carburos metálicos" aquesta disposa d'una planta de dipòsits criogènics estàtics que permeten la instal·lació tipus per Nitrogen, Oxigen, Argó i Diòxid de Carboni líquids.

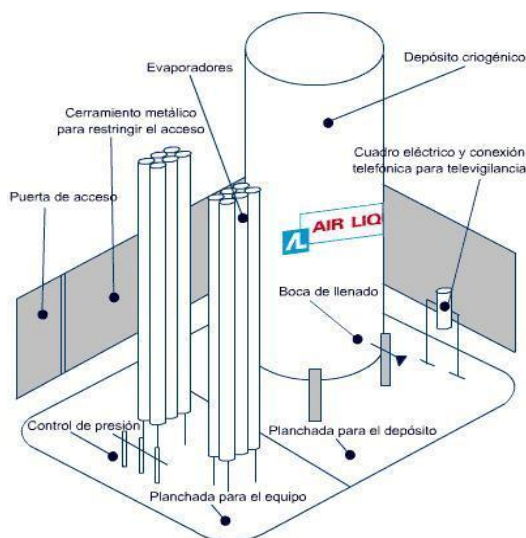


Figura 11.11.5.1: Exemple d'un tanc criogènic per l'emmagatzematge de nitrogen líquid.

11.12. Energia elèctrica

11.12.1. Introducció

Totes les indústries químiques requereixen electricitat per a que els equips funcionin correctament i a la vegada per a la il·luminació de la pròpia fàbrica. També s'ha de tenir en compte tota la instrumentació per al control dels diversos equips presents en la indústria.

L'empresa 'MOJMO' comprarà l'electricitat proporcionada com d'alta tensió i farà falta un transformador que transformi aquesta electricitat d'alta tensió a baixa tensió, ja que al llarg de la planta de producció del FREON-13 es requerirà un voltatge de 380 V.

Les línies elèctriques instal·lades en el procés corresponen a línies elèctriques trifàsiques amb aïllament per tal de ser protegits de qualsevol equip o instrument que pugui provocar qualsevol tipus de problema al tram elèctric. Una vegada la transformadora hagi passat d'una electricitat d'alta tensió a una de baixa, es disposarà d'una caixa de protecció, repartides segons la zona on s'especifiqui la seva distribució, mitjançant la utilització de fusibles.

També s'ha de tenir en compte de la simultaneïtat elèctrica, és a dir, el moment en el qual tots els equips estiguin en funcionament i requereixin l'electricitat màxima instal·lada.

11.12.2. Càlcul de la potència total instal·lada

Seguidament es proporcionarà el mètode de càlcul per a la potencia total instal·lada necessària per a la planta de producció del FREON-13.

$$P = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot f$$

On:

P = Potència nominal (W)

V = Voltatge (380 V)

I = Intensitat (A)

f = Factor de potència ($\cos \varphi = 0,85$)

Es considera una pèrdua de tensió d'un 5% que es calcula a través de la següent equació:

$$\Delta V = \frac{L \cdot I \cdot f \cdot \sqrt{3}}{k \cdot S}$$

On:

ΔV = Pèrdua de tensió (V)

L = Longitud del tram de cable entre el transformador i la zona (m)

k = constant del material elèctric (Cu = 56)

S = secció transversal del cable (mm)

11.13. Procediment de càlcul de les canonades de procés

Per tal d'implementar les canonades en el procés, primerament s'ha de saber tots els paràmetres requerits del fluid que es troba en circulació. Per al procediment de càlcul de les canonades, s'especificarà el mètode de càlcul per al disseny del diàmetre interior, exterior i el aïllament necessari per a que la temperatura dins de la canonada sigui constant.

11.13.1. Càlcul del diàmetre intern de canonada

El càlcul del diàmetre intern es troba relacionat amb les propietats del fluid que circula, com és el cabal i la seva velocitat de circulació, a continuació es mostrarà l'equació utilitzada per a especificar el diàmetre intern.

$$D_{intern} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}}$$

On:

Q = cabal volumètric del fluid de circulació (m³/s)

v = velocitat del fluid de circulació (m/s)

Per tal de saber la velocitat del fluid a la qual circula, es segueixen les següents dades bibliogràfiques on s'especifiquen les velocitats típiques dels diferents fluids de procés.

Taula 11.13.1.1: Velocitats típiques en el tram de canonada.

Tipus de fluid	Tram de circulació	Velocitat (m/s)
Líquid no viscos	Canonada d'aspiració	0,6-0,9 m/s
	Canonada d'impulsió	1,25-2,05 m/s
Líquid viscos	Canonada d'aspiració	0,06-0,25 m/s
	Canonada d'impulsió	0,15-0,6 m/s
Gasos	-	9-36 m/s
Vapors	-	9-26 m/s

Per al procés, s'estableixen unes velocitats per al líquid de 1 m/s que correspon a una velocitat mitjana a l'especificada a la Taula 11.13.1.1; i una velocitat típica per als gasos de 20 m/s.

Una vegada s'ha calculat els el diàmetre intern en mil·límetres, a partir de la taula següent, especificarem el seu diàmetre nominal (D_N) segons la relació que hi ha entre els mm de canonada i les polsades a que corresponen.

Taula 11.13.1.2: Diàmetre nominal (") segons el mm de diàmetre intern de la canonada.

pipe size				
inches	mm	STD	Wall	WT
1/8"	10,3	1,7	0,257	
1/4"	12,7	2,2	0,625	
3/8"	17,1	2,3	0,643	
1/2"	21,3	2,8	1,26	
3/4"	26,7	2,9	1,63	
1"	33,4	3,4	2,50	
1.1/4"	42,2	3,6	3,38	
1.1/2"	48,3	3,7	4,05	
2"	60,3	3,9	5,43	
2.1/2"	73	5,2	8,62	
3"	88,9	5,5	11,3	
3.1/2"	101,6	5,7	13,6	
4"	114,3	6	15,1	
5"	141,3	6,6	21,3	
6"	168,3	7,1	23,2	
8"	219,1	8,2	42,5	
10"	273	9,3	60,2	
12"	323,9	9,5	73,8	
14"	355,6	9,5	81,2	
16"	406,4	9,5	92,1	
18"	457,2	9,5	105	
20"	508	9,5	117	
22"	558,8	9,5	129	
24"	609,6	9,5	141	
26"	660,4	9,5	153	
28"	711,2	9,5	165	
30"	762	9,5	176	
32"	812,8	9,5	188	
34"	863,6	9,5	200	
36"	914,4	9,5	212	

11.13.2. Càlcul del diàmetre extern de canonada

El procediment de càlcul del diàmetre exterior de la canonada segueix el mateix patró que per al càlcul dels espessors del diferents equips esmentats en els apartats anteriors. Es calcula en base al codi ASME amb la següent equació:

$$\frac{(D_{ext} - D_{int})}{2} = \Delta x_{canonada} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_1 + C_2$$

On:

$\Delta x_{canonada}$ = gruix de la canonada (Pa)

P = pressió a la qual circula el fluid (Pa)

R = radi intern de la canonada (m)

S = esforç de disseny màxim del material de canonada (Pa)

E = eficiència de soldadura (E=0,85)

C_1 = espessor afegit per corrosió (m)

C_2 = tolerància a la corrosió (m)

Una vegada hem calculat el gruix/espessor de la canonada, aïllem el diàmetre extern per a saber el seu valor:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot \Delta x_{canonada}$$

On:

$\Delta x_{canonada}$ = gruix de la canonada (Pa)

D_{ext} = diàmetre extern de la canonada (m)

D_{int} = diàmetre intern de la canonada (m)

11.14. Procediment de càlcul de les bombes de procés

Per a fer el càlcul de les bombes, primerament s'haurà de saber la longitud del tram que ha de superar el fluid que hi circula, i si realment requereix o no d'un sistema de bombeig. Per tant, s'haurà de calcular les pèrdues que hi han al llarg del tram de canonada i la càrrega del sistema que ha de superar.

11.14.1. Càlcul de les pèrdues totals

Primerament, es calcularà el Reynolds (Re) en la canonada a partir de la següent equació:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_{int}}{\mu}$$

On:

ρ = densitat del fluid (Kg/m³)

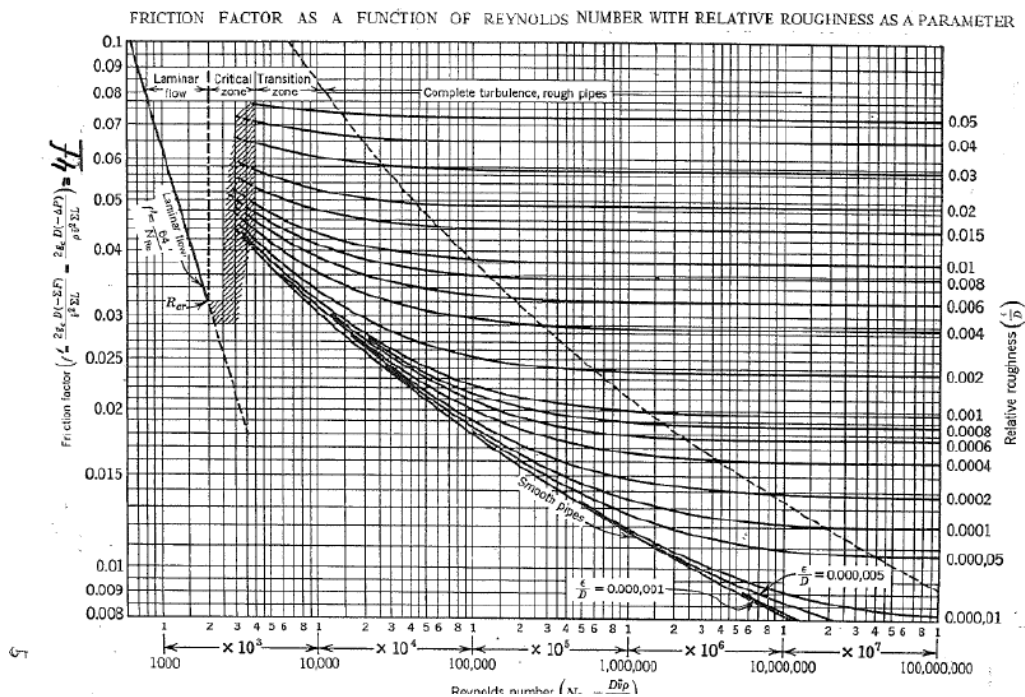
v = velocitat que circula el fluid (m/s)

D_{int} = diàmetre intern de la canonada (m)

μ = viscositat del fluid (Kg/m·s)

S'escull una rugositat per la canonada, en aquest cas, un valor estàndard referit a l'acer inoxidable, la rugositat (ϵ) serà de $4,6 \times 10^{-5}$. A partir de la rugositat i el Reynolds podem calcular el factor de fricció (4f) gràficament amb el diagrama de Moody:

Taula 11.14.1.1: Diagrama de Moody (Relació ε/D_{int} i Re i $4f$).



Una vegada obtingut el valor de $4f$, es podrà calcular les pèrdues en els trams rectes i les pèrdues per accidents, seguint les equacions mostrades a continuació:

$$ev_{rectes} = 4f \frac{L \cdot v^2}{2 \cdot D_{int.}}$$

$$ev_{accidents} = 0,15 \cdot ev_{rectes}$$

$$ev_{totals} = ev_{rectes} + ev_{accidents}$$

On:

ev_{rectes} = pèrdues per fricció en trams rectes (m^2/s^2)

v = velocitat del fluid (m/s)

f = factor de fricció

L = longitud de la canonada (m)

D_{int} = diàmetre intern (m)

$ev_{accidents}$ = pèrdues per fricció de trams amb accidents (m^2/s^2)

ev_{totals} = pèrdues per fricció totals (m^2/s^2)

Com es pot veure, s'ha considerat que els accidents corresponen a un 15% de les pèrdues en els trams rectes, ja que no se sap detalladament el número exacte d'accidents presents en cadascuna de les canonades presents en el procés.

11.14.2. Càlcul de la potència de la bomba

Finalment, es calcula la potència requerida en la bomba a partir d'un balanç del treball màssic:

$$\hat{W} = g \cdot (z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{v_2^2}{\alpha} - \frac{v_1^2}{\alpha} \right) + ev_{totals}$$

On:

W = treball màssic (J/Kg) , z_2 = Alçada punt 2 (m)

z_1 = Alçada punt 1 (m) , P_2 = pressió del punt 2 (Pa)

P_1 = pressió del punt 1 (Pa) , V_1 = velocitat fluid punt 1 (m/s)

V_2 = velocitat fluid punt 2 (m/s), $\alpha = 1$ per $Re > 2100$

ρ = densitat del fluid (Kg/m³), g = gravetat (9,81 m/s²)

$$W = \hat{W} \cdot Q \cdot \rho$$

On:

W = Treball (W)

$\hat{W}$ = treball màssic (J/Kg)

Q = Cabal del fluid (m³/s)

ρ = densitat del fluid (Kg/m³)

Amb l'equació següent es calcularà la càrrega total del sistema:

$$h = h_{asp.} - h_{imp.}$$

$$h = \hat{W} / g$$

On:

$\hat{W}$ = treball màssic (J/Kg)

g = gravetat (9,81 m/s²)

h = càrrega total del sistema (m)

Per saber la potència de la bomba, es calcula a partir del rendiment propi de la bomba, on s'especifica que la bomba treballarà a un rendiment de un 55%.

$$P = W / \eta$$

On:

W = Treball (W)

P = potència de la bomba (W)

η = rendiment de la bomba (0,55)

11.15. Decantador (D-901)

Es decideix implementar un decantador per tal de separar el catalitzador (SbCl_5) de la resta de components de procés. Aquest decantador operarà una vegada s'hagi arribat al moment de la parada de la planta, degut a la inhibició del catalitzador, d'aquesta manera separem el catalitzador que serà tractat per un gestor extern i la resta de components seran reaprofitats en el procés de producció. El temps de decantació es calcula a partir de la següent fórmula:

$$t(\text{hores}) = \frac{6,24 \cdot \mu}{\rho_a - \rho_b}$$

On:

μ = Viscositat del pentaclorur d'antimoni (1,05 cP).

ρ_a = densitat del pentaclorur d'antimoni (150, 5 lb/ft³).

ρ_b = densitat de la fase lleugera (78,6 lb/ft³).

$$t(\text{hores}) = 0,091 \text{ hores} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = \mathbf{5,5 \text{ min}}$$

A partir d'aquest temps de residència i el cabal a tractar, podem saber el volum del decantador que s'haurà d'implementar:

$$V(\text{m}^3) = Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \cdot t(\text{h}) = 4,38 \cdot 0,091 = 0,40 \text{ m}^3$$

Aquest volum es sobredimensiona un 15%, obtenint un volum total de 0,46 m³.

Per al càlcul del diàmetre i l'altura del decantador, s'utilitzen les fórmules que seran exposades a continuació.

$$V_1 = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h$$

$$h = 1,2 \cdot D$$

$$V_1 = 0,46 \text{ m}^3 = 0,3\pi \cdot D^3$$

$$D(m) = 0,79 \text{ m} , \quad h(m) = 0,95 \text{ m}$$

També s'ha de tenir en compte el volum ocupat pels toriesfèrics, per tant el volum serà major hi s'haurà de recalculer el diàmetre i la altura real del decantador. Per al càlcul dels toriesfèrics del decantador, a partir de les dades bibliogràfiques, es calcula a partir de la següent relació:

$$V_{toriesf.} (m^3) = 0,1 \cdot D^3 = 0,05 \text{ m}^3$$

$$V_{TOTAL} (m^3) = V_1 + 2 \cdot V_{toriesf.} = \mathbf{0,56 \text{ m}^3}$$

Per tant el diàmetre i altura de l'equip serà:

$$D(m) = 0,84 \text{ m} , \quad h(m) = 1 \text{ m}$$

