



# Planta per la fabricació de $\text{CClF}_3$

*Grau en Enginyeria Química*

*Tutora: M<sup>a</sup> Eugenia Suárez Ojeda*

## ***PART III: VOLUMS IX, X, Bibliografia i Apèndix***

Andrés Palacios

Pedro Guerrero

Marc Catalá

Alberto Cárceles

Laia Camprubi

# Índex

---

1. *Volum IX: P&IDs*
2. *Volum X: Disseny d'equips*
3. *Bibliografia*
4. *Apèndix*

# **VOLUM X:**

## **Disseny d'equips**



# Índex

---

|           |                                                               |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------|----|
| 10.1.     | Disseny de tancs d'emmagatzematge.....                        | 3  |
| 10.1.1.   | Característiques dels productes emmagatzemats .....           | 3  |
| 10.1.2.   | Disseny de tancs d'emmagatzematge de matèries primeres .....  | 3  |
| 10.1.2.1. | Tancs d'àcid fluorhídric anhidre T-10X.....                   | 3  |
| 10.1.2.2. | Tancs de tetraclorometà T-11X.....                            | 9  |
| 10.1.3.   | Cubetes de retenció .....                                     | 12 |
| 10.1.3.1. | Cubeta per als tancs d'àcid fluorhídric anhidre .....         | 14 |
| 10.1.3.2. | Cubeta per als tancs de tetraclorometà.....                   | 15 |
| 10.2.     | Disseny de reactors .....                                     | 16 |
| 10.2.1.   | Reactor 1ª fluoració R-201 .....                              | 16 |
| 10.2.2.   | Reactor 2ª fluoració R-401 i R-402 .....                      | 31 |
| 10.3.     | Disseny membrana i tanc de cloració de $\text{SbCl}_5$ .....  | 38 |
| 10.3.1.   | Membrana de Nanofiltració.....                                | 38 |
| 10.3.2.   | Tanc de cloració de $\text{SbCl}_5$ .....                     | 41 |
| 10.4.     | Columnes de destil·lació .....                                | 46 |
| 10.4.1    | Disseny numèric .....                                         | 46 |
| 10.4.2.   | Dimensionament de les columnes .....                          | 53 |
| 10.4.3.   | Disseny mecànic.....                                          | 55 |
| 10.4.     | Disseny de l'absorbidor .....                                 | 65 |
| 10.6.1    | Cabals a partir de Balanços de matèria.....                   | 67 |
| 10.6.2    | Temperatura d'operació i necessitats de refrigeració .....    | 68 |
| 10.6.3    | Diàmetre intern i nombre de tubs .....                        | 69 |
| 10.6.4    | Coeficient global U, àrea de bescanvi i longitud mínima ..... | 70 |
| 10.6.4.1  | Càlcul del coeficient extern .....                            | 71 |
| 10.6.4.2  | Càlcul del coeficient intern.....                             | 73 |

|          |                                                                            |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.6.4.3 | Càlcul de la U i longitud mínima.....                                      | 74  |
| 10.6.5   | Longitud de tubs segons la transferència de matèria.....                   | 74  |
| 10.6.6   | Absorbidor adiabàtic A-302.....                                            | 77  |
| 10.5.    | Bescanviadors de calor.....                                                | 78  |
| 10.5.1   | Funcionament del programa.....                                             | 78  |
| 10.5.2.  | Exemple de càlcul per al reboiler RB-202. ....                             | 82  |
| 10.5.3.  | Funcionament dels bescanviadors.....                                       | 83  |
| 10.6.    | Càlcul de canonades.....                                                   | 86  |
| 10.7.    | Tancs pulmó, de condensats, d'expansió i mescladors .....                  | 86  |
| 10.7.1.  | Tanc de mescla T-201.....                                                  | 86  |
| 10.7.2.  | Tanc de mescla T-202.....                                                  | 88  |
| 10.7.3.  | Tanc pulmó T-301.....                                                      | 90  |
| 10.7.4.  | Tanc de mescla T-401.....                                                  | 92  |
| 10.7.5.  | Tancs d'expansió T-203, T-302, T-402 i T-403.....                          | 94  |
| 10.7.6.  | Tancs de condensats T-CN201, T-CN202, T-CN203, T-CN401, T-CN402 i T-CN403. | 96  |
| 10.8.    | Serveis .....                                                              | 98  |
| 10.8.1.  | Sistema de fred (chiller) .....                                            | 98  |
| 10.8.2.  | Torres de refrigeració.....                                                | 102 |
| 10.8.3.  | Vapor d'aigua .....                                                        | 105 |
| 10.8.4.  | Gas natural .....                                                          | 107 |
| 10.8.5.  | Aigua descalcificada .....                                                 | 108 |
| 10.8.6.  | Electricitat .....                                                         | 109 |
| 10.8.7.  | Aire comprimit .....                                                       | 111 |
| 10.8.8.  | Nitrogen.....                                                              | 111 |
| 10.9.    | Tractament de gasos .....                                                  | 111 |
| 10.9.1   | Scrubber càustic .....                                                     | 112 |
| 10.9.2   | Torre d'adsorció de carbó actiu. ....                                      | 113 |

## 10. Disseny d'equips

---

### 10.1. Disseny de tancs d'emmagatzematge

#### 10.1.1. Característiques dels productes emmagatzemats

Els reactius principals en la producció del  $\text{CClF}_3$  són l'àcid fluorhídric anhidre i el tetraclorometà. També s'utilitzen catalitzadors per facilitar les reaccions desitjades. Per tal de dissenyar els sistemes d'emmagatzematge d'aquests productes, així com d'altres que es contenen en tancs de procés, cal tenir en compte les següents característiques en relació a la seva perillositat.

Àcid fluorhídric anhidre. A temperatura ambient és un gas o líquid incolor que desprèn vapors d'olor acre. La dissolució en aigua és un àcid fort que reacciona amb violència amb bases i és corrosiva. Reacciona amb el vidre, alguns metalls, plàstics i revestiments. Pot reaccionar amb molts compostos originant perill d'incendi i explosió. És una substància molt tòxica.

Tetraclorometà. És un líquid incolor d'olor característic a temperatura ambient. El seu punt d'ebullició és 76,5 °C, però els vapors que forma són més densos que l'aire. En contacte amb superfícies calentes o amb foc es descompon formant fums tòxics i corrosius ( $\text{HCl}$ ,  $\text{Cl}_2$  i  $\text{COCl}_2$ ). Reacciona amb alguns metalls com alumini, magnesi i zinc, originant perill d'incendi i explosió. És una substància tòxica i no s'ha de permetre que s'incorpori al medi ambient.

#### 10.1.2. Disseny de tancs d'emmagatzematge de matèries primeres

##### 10.1.2.1. Tancs d'àcid fluorhídric anhidre T-10X

##### Consideracions

Per tal de fer el disseny de tancs d'emmagatzematge d'àcid fluorhídric de l'Àrea 100, s'han tingut en compte les següents consideracions:

- ASTM D-1998: *Standard Specification for Polyethylene Upright Storage Tanks*.
- Normativa APQ-6 per líquids corrosius i APQ-7 per líquids tòxics.
- Tanc d'emmagatzematge vertical, cilíndric, fons superior torisfèric i fons inferior pla.

Tenint en compte que l'àcid fluorhídric anhidre és un líquid corrosiu i molt tòxic, es segueix el reglament APQ6 i APQ7, dissenyant-se un parc d'emmagatzematge adequat a aquestes normatives.

### Capacitat i dimensions

Sabent que la quantitat necessària d'HF anhidre per produir les 10.000 tones anuals de CFC-13 és de 20 m<sup>3</sup>/dia, i donat que el subministrament d'àcid fluorhídric es duu a terme mitjançant camions cisterna i que serà necessari omplir els tancs cada setmana, s'haurà de mantenir la quantitat necessària per poder abastir la producció com a mínim dues setmanes, per si hi hagués qualsevol problema amb el proveïdor i no pogués subministrar la quantitat desitjada quan toca. Per tal d'evitar que els tancs es buidïn completament, es sobredimensionarà el volum total un 20%:

$$20 \frac{m^3}{dia} \cdot 14 \text{ dies} = 280 m^3$$

$$V_{total HF} = 280 m^3 \cdot (1,2) = 336 m^3$$

Es decideix que el total de tancs d'emmagatzematge del HF anhidre sigui de sis tancs, donat que els volums típics per a tancs d'emmagatzematge de polietilè d'alta densitat (HDPE), material del qual estaran fets els tancs, rondin els 40-60 m<sup>3</sup>.

$$V_{tancs} = \frac{336 m^3}{6 \text{ tancs}} = 56 \frac{m^3}{tanc} \approx 60 m^3 \text{ per cada tanc}$$

El diàmetre intern dels tancs serà de 3.5 metres, per tant, es pot calcular l'alçada d'aquests tancs com s'expressa a continuació, on r és el radi intern dels cilindres dels tancs.

$$H_{cilindre} = \frac{V_{tanc}}{\pi r^2} \quad \text{Equació X-1}$$

$$H_{cilindre} = \frac{60 m^3}{\pi \cdot \left(\frac{3,5 m}{2}\right)^2} = 6.24 m \text{ d'alçada tindrà cada cilindre de cada tanc}$$

El fons superior toriesfèric tindrà una alçada que es calcula a continuació, on h és l'alçada del fons, D és el diàmetre intern dels tancs i  $\alpha=10^\circ$ .

$$h = \tan(\alpha) \cdot \frac{D}{2} \quad \text{Equació X-2}$$

$$h = \tan(10) \cdot \left(\frac{3,5 m}{2}\right) = 0,31 m \text{ d'alçada del fons superior toriesfèric}$$



### Material dels tancs

Per emmagatzemar l'àcid fluorhídric anhidre s'utilitzaran quatre tancs de 70 m<sup>3</sup> d'un material apte per resistir la forta corrosió que suposa l'HF. En primera instància, es va proposar fabricar els tancs de acer al carboni.

Es va trobar, però, que el temps màxim d'emmagatzematge de l'HF anhidre en acer al carboni és de dos anys, per la qual cosa no seria viable aquest material tenint en compte el cost econòmic que suposa canviar quatre tancs fabricats d'acer al carboni, de 70 m<sup>3</sup> cadascun, cada dos anys. Així, el material més adient que s'ha trobat és el polietilè d'alta densitat, que és resistent a la corrosió que ocasiona l'anhidre d'àcid fluorhídric i les possibles solucions aquoses d'aquesta substància.

### Pressió de disseny

Els tancs d'àcid fluorhídric anhidre treballaran a pressió atmosfèrica, tenint en compte la pressió hidrostàtica del líquid contingut, la qual es pot calcular sabent l'alçada del líquid a l'interior dels tancs. Tenint en compte que hi ha 4 tancs per emmagatzemar 274.2 m<sup>3</sup> cada 2 setmanes, s'omplen 56 m<sup>3</sup> per tanc.

$$H_{\text{liquid}} = \frac{V_{\text{liquid}}}{\pi r^2} \quad \text{Equació X-3}$$

$$H_{\text{liquid}} = \frac{56 \text{ m}^3}{\pi \cdot \left(\frac{3,5 \text{ m}}{2}\right)^2} = 5,82 \text{ m d'alçada de líquid a cada tanc}$$

Així, la pressió exercida pel líquid als tancs és de:

$$P_{\text{liquid}} = \rho \cdot g \cdot H_{\text{liquid}} \quad \text{Equació X-4}$$

$$P_{\text{liquid}} = 0,99 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 10^3 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5,82 \text{ m} = 56.528,34 \text{ Pa} = 0,565 \text{ bar}$$

Ara es pot calcular la pressió de disseny dels tancs d'àcid fluorhídric anhidre:

$$P = P_{op} + P_{\text{liquid}} + 0,2 \cdot (P_{op} + P_{\text{liquid}}) \quad \text{Equació X-5}$$

$$P = 1,013 \text{ bar} + 0,565 \text{ bar} + 0,2 \cdot (1,013 \text{ bar} + 0,565 \text{ bar}) = 1,894 \text{ bar}$$



### Temperatura de disseny

Tenint en compte que l'HF anhidre té un punt d'ebullició igual a 20 °C, proper a la temperatura ambient en alguns moments de l'any, caldrà mantenir refrigerats els 6 tancs a una temperatura que asseguri que el producte no forma vapors en quantitats importants ni perilloses: propera als 7 °C. El fet de disminuir la temperatura de la substància fa que la seva pressió de vapor disminueixi considerablement, per tant es minimitzen els riscos per sobrepressions i fugues.

El sistema de refrigeració serà un serpentí fabricat d'un material resistent a la corrosió que pot ocórrer a l'interior dels tancs d'emmagatzematge. Es farà servir serpentins de Hastelloy per tal de mantenir la temperatura rondant els 7 °C a cada tanc sense patir els efectes de la corrosió.

Per poder saber les dimensions del serpentí de refrigerant de cada tanc, es presenta un llistat d'equacions. Per calcular el flux calorífic entre l'exterior i els tancs:

$$Q = \frac{k}{\Delta x} \cdot (T_e - T_i) \quad \text{Equació X-6}$$

On Q és el flux calorífic, en W/m<sup>2</sup>, k és la conductivitat tèrmica del HDPE, igual a 0.50 W/m·K, Δx és l'espessor de la paret del tanc, en metres i Te i Ti són les temperatures exterior i interior, respectivament, en °C.

Per saber l'àrea de bescanvi a la paret, s'aplica la següent expressió:

$$A_p = A_{cil} + A_{fsup} = \pi \cdot D_{cil} \cdot H_{cil} + \pi \cdot D_f \cdot H_f \quad \text{Equació X-7}$$

On Ap és l'àrea de bescanvi a la paret, en m<sup>2</sup>, Acil és l'àrea del cilindre del tanc, i Afsup és l'àrea del fons torisfèric superior, ambdues en m<sup>2</sup>. Dcil és el diàmetre del cilindre, Hcil l'alçada del cos cilíndric, Df és el diàmetre del fons superior i Hf la seva alçada, tots en metres.

Si es vol calcular el flux calorífic entre el serpentí i el fluid que conté cada tanc, cal utilitzar:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Equació X-8}$$

On q és el flux calorífic (W), que es pot igualar al flux calorífic Q per l'àrea de bescanvi a la paret. U és el coeficient global de transferència de calor, en W/m<sup>2</sup>·K, A és l'àrea necessària per bescanviar el calor, en metres quadrats i ΔTml és la diferència de temperatura mitjana logarítmica, en K.

Amb la fórmula anterior, hom pot aïllar A i calcular, per tant, l'àrea de bescanvi de calor necessària. Pel que fa a  $\Delta T_{ml}$ , es té:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Equació X-9}$$

On  $\Delta T_1$  és la diferència de temperatures entre el fluid al tanc i l'entrada i  $\Delta T_2$  és la diferència de temperatura entre el fluid del tanc i la sortida.

Un cop obtinguda l'àrea necessària de bescanvi de calor, A, es pot calcular el nombre de voltes necessàries al serpentí:

$$A = N_v \cdot (\pi \cdot D_v \cdot D_s) \quad \text{Equació X-10}$$

On  $N_v$  és el nombre de voltes del serpentí, el  $D_v$  és el diàmetre de cada volta, que s'ha decidit que serà de 2 m, i  $D_s$  és el diàmetre intern del serpentí, de 0.10 m.

Es va escollir una distància entre cada volta (d) de 1.5 vegades el diàmetre del serpentí, és a dir, de 0.15 m. Amb això i amb la següent equació, es pot determinar l'alçada que tindrà el serpentí:

$$H_s = N_v \cdot D_s + d \cdot (N_v - 1) \quad \text{Equació X-11}$$

Amb això, el serpentí compleix les següents especificacions:

**Taula X – 1. Dades utilitzades en el disseny del serpentí dels tancs T-10X.**

| <b>Paràmetre disseny serpentí (unitats)</b>                        | <b>Valor</b> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| Calor a bescanviar, q (W)                                          | 6.782,81     |
| Coefficient global de bescanvi de calor, U (W/ m <sup>2</sup> ·K)) | 100          |
| Àrea de bescanvi, A (m <sup>2</sup> )                              | 9,4          |
| Nº voltes del serpentí, $N_v$                                      | 15           |
| Diàmetre intern del serpentí, $D_s$ (m)                            | 0,10         |
| Diàmetre de les voltes, $D_v$ (m)                                  | 2            |
| Distància entre voltes, d (m)                                      | 0,5          |
| Alçada total serpentí (m)                                          | 3,60         |

El cabal de refrigerant necessari, que en aquest cas serà *Dowtherm J*, es pot calcular amb la següent expressió:

$$m = \frac{q}{c_p \cdot \Delta T} \quad \text{Equació X-11}$$

$$m = \frac{6782,81 \frac{J}{s}}{1.769 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (5 - (-5))K} = 0,383 \frac{kg}{s} = 1.380,33 \frac{kg}{h}$$

On m és el cabal màssic de fluid refrigerant, en kg/s, q és el calor bescanviat, en W (J/s), Cp és la calor específica del refrigerant a la temperatura mitjana, en J/kg·K i ΔT és la diferència de temperatura entre l'entrada del refrigerant al tanc i la sortida del mateix, en K.

S'ha decidit que el refrigerant en els tancs sigui el Dowtherm J perquè es pretén evitar en tot cas que el líquid contingut en els tancs, l'àcid fluorhídric anhidre, entri en contacte amb aigua, la qual cosa originant una situació perillosa. Tanmateix, es pretén entrar el refrigerant a -5°C, amb la qual cosa seria inviable utilitzar l'aigua per a la refrigeració.

#### Espessor dels tancs

Pel que fa al càlcul dels espessors necessaris, s'han utilitzat les bases de la ASTM: D-1998. Mitjançant les dades esmentades a continuació, es pot fer el càlcul de l'espessor necessari en els 4 tancs d'àcid fluorhídric anhidre:

$$t = \frac{0,433 \cdot SG \cdot H_{liquid} \cdot D}{2 \cdot DHS} \quad \text{Equació X-13}$$

$$t = \frac{0,433 \frac{psi}{ft} \cdot 1 \cdot (19,10 ft) \cdot (t + 137,8 in)}{2 \cdot 1.000 psi} \rightarrow t = 0,57 in$$

$$t = 13,21 mm$$

On t és l'espessor del tanc, 0.433 és un coeficient de pressió en una columna d'aigua d'un peu, SG és la gravetat específica del producte a la temperatura corresponent, D és el diàmetre extern del tanc (igual a diàmetre intern més el valor de l'espessor t que es vol obtenir) i DHS és el *design hoop stress* (esforç de disseny) a la temperatura corresponent.

El valor de l'espessor del tanc s'aproxima a 14 mm. Degut a la forta corrosió que suposa el àcid fluorhídric, es farà fabricar els tancs amb 2 mm adicional d'espessor. Així, el gruix dels tancs serà de 16 mm.

#### Pes dels tancs

El pes de cada tanc s'ha de calcular tenint en compte la densitat del material utilitzat, en aquest cas polietilè d'alta densitat, i els volums útils de cada part dels tancs:

$$Pes_C = \rho_C \cdot Volum_C = 925 \frac{kg}{m^3} \cdot \pi \cdot H \cdot r \cdot t \quad \text{Equació X-14}$$

$$Pes_{Fs} = \rho_{Fs} \cdot Volum_{Fs} = 925 \frac{kg}{m^3} \cdot [(0,081 \cdot D_{ext}^3) - (0,081 \cdot D_{int}^3)] \quad \text{Equació X-15}$$

$$Pes_{Fi} = \rho_{Fi} \cdot Volum_{Fi} = 925 \frac{kg}{m^3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \cdot t \quad \text{Equació X-16}$$

$$Pes_{tanc} = Pes_C + Pes_{Fs} + Pes_{Fi} \quad \text{Equació X-17}$$

On els subíndex C, Fs i Fi corresponen a *cos cilíndric*, *fons superior* i *fons inferior*, respectivament,  $\rho$  és la densitat del polietilè, H és l'alçada de la virola, Dext és el diàmetre extern, Dint és el diàmetre intern i t és l'espessor del tanc.

### 10.1.2.2. Tancs de tetraclorometà T-11X

#### Consideracions

En el disseny de tancs d'emmagatzematge de tetraclorometà s'han tingut en compte les següents normatives:

- API Standard 620: *Design and construction of large welded low pressure storage tanks*
- Normativa APQ 7 per líquids tòxics
- Tancs cilíndrics, verticals, amb fons superior i inferior toricsfèrics

#### Capacitat i dimensions

La quantitat necessària de tetraclorometà anual és de 15336 t/any, és a dir, 32.15 m<sup>3</sup> cada dia. Per evitar que els tancs es buidin completament, es sobredimensionarà el volum total de CCl<sub>4</sub> un 20%:

$$V_{total\ CCl_4} = 32 \frac{m^3}{dia} \cdot (1,2) \cdot 14\ dies = 537,6\ m^3$$

Es decideix que el total de tancs on s'emmagatzemi el tetraclorometà serà de 6 tancs:

$$V_{tancs} = \frac{537,6\ m^3}{6\ tancs} = \frac{89,6\ m^3}{tanc} \approx 90\ m^3\ per\ cada\ tanc$$

El diàmetre intern dels tancs serà de 4.5 metres, per tant, es pot calcular l'alçada dels cilindres de cada tanc com s'expressa a continuació, utilitzant l'Equació X-1.

$$H_{cilindre} = \frac{90\ m^3}{\pi \cdot \left(\frac{4,5\ m}{2}\right)^2} = 5,66\ m\ d'alçada\ que\ tindrà\ cada\ cilindre$$

Els fons toriesfèric tindran una alçada que es calcula a continuació, amb l'Equació X-2

$$h = t = \tan(10) \cdot \left(\frac{4,5 \text{ m}}{2}\right) = 0,4 \text{ m d'alçada per fons toriesfèric}$$

#### Material dels tancs

Els materials més comuns utilitzats per a l'emmagatzematge d'aquesta substància són acers al carboni o acer inoxidable. Cal tenir en compte que el  $\text{CCl}_4$  és una substància no corrosiva, però sí que és tòxica per exposició i pel medi ambient. Amb això, es decideix que el material adient per a emmagatzemar el producte sigui acer inoxidable del tipus 304.

#### Pressió de disseny

Els tancs de  $\text{CCl}_4$  anhidre treballaran a pressió atmosfèrica, tenint en compte la pressió hidrostàtica del líquid contingut, la qual es pot calcular sabent l'alçada del líquid a l'interior dels tancs. Tenint en compte que hi ha 6 tancs per emmagatzemar  $517,44 \text{ m}^3$ , s'omplen  $89,6 \text{ m}^3$  per tanc. Amb l'Equació X-3 es calcula l'alçada de líquid:

$$H_{\text{liquid}} = \frac{89,6 \text{ m}^3}{\pi \cdot \left(\frac{4,5 \text{ m}}{2}\right)^2} = 5,63 \text{ m d'alçada de líquid a cada tanc}$$

Així, la pressió exercida pel líquid es calcula amb l'expressió X-4:

$$P_{\text{liquid}} = 1,59 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 10^3 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5,63 \text{ m} = 87.816,18 \text{ Pa} = 0,878 \text{ bar}$$

Es calcula la pressió de disseny dels tancs, amb la següent expressió (Equació X-5).

$$P = 1,013 \text{ bar} + 0,878 \text{ bar} + 0,2 \cdot (1,013 \text{ bar} + 0,878 \text{ bar}) = 2,27 \text{ bar}$$

#### Temperatura de disseny

Tenint en compte que el  $\text{CCl}_4$  anhidre té un punt d'ebullició igual a  $76,5^\circ\text{C}$ , serà possible mantenir els 6 tancs a temperatura ambient. Per tant, en aquest cas no es necessari cap sistema de refrigeració. La temperatura de disseny serà de  $70^\circ\text{C}$ .

#### Espessor dels tancs

Mitjançant les dades esmentades, a continuació es pot fer el càlcul de l'espessor necessari en els fons toriesfèrics dels tancs d'emmagatzematge.

$$t_{fons} = \frac{P \cdot R \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} \quad \text{Equació X-18}$$

$$t_{fons} = \frac{32.9 \text{ psi} \cdot 118.11 \text{ in} \cdot 1.54}{2 \cdot 23750 \text{ psi} \cdot (0.85) - 0.2 \cdot 32.9 \text{ psi}} = 0.148 \text{ in} \approx 4 \text{ mm}$$

Pel que fa al cos cilíndric, es té en compte la següent equació per calcular l'espessor:

$$t_{cilindre} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} \quad \text{Equació X-19}$$

$$t_{cilindre} = \frac{32.9 \text{ psi} \cdot 118.11 \text{ in}}{23750 \text{ psi} \cdot (0.85) - 0.6 \cdot 32.9 \text{ psi}} = 0.193 \text{ in} \approx 5 \text{ mm}$$

On  $t_{cilindre}$  és l'espessor del tanc,  $t_{fons}$  és el gruix dels fons torisfèrics,  $P$  és la pressió de disseny,  $R$  és el radi més gran dels fons i el radi del cilindre,  $M$  és el factor de radi, tabulat pel codi ASME segons la relació  $R/r$  (on  $r$  és el radi menor dels fons torisfèrics, en aquest cas de 300 mm),  $S$  és l'esforç de tensió del material de fabricació (25% de l'esforç últim a la tensió) i  $E$  és el factor de soldadura.

Addicionant un espessor de corrosió d'1 mm, per prevenció, el gruix final del tanc serà de 5 mm en els fons torisfèrics i de 6 mm en el cos cilíndric.

#### Pes dels tancs

El pes de cada tanc s'ha de calcular tenint en compte la densitat del material utilitzat i els volums útils de cada part dels tancs. La densitat del AISI 304 és de  $7.930 \text{ kg/m}^3$ , i per calcular el pes del cilindre dels tancs i dels fons torisfèrics es fa servir les Equacions X-13 i X-14, respectivament.

El pes dels tancs buits serà, llavors, calculat amb la següent expressió:

$$Pes_{tanc} = Pes_C + 2 \cdot Pes_F \quad \text{Equació X-20}$$

On els subíndex C i F corresponen a *cos cilíndric* i *fons torisfèrics*, respectivament,  $\rho$  és la densitat de l'acer,  $H$  és l'alçada del cos cilíndric,  $D_{ext}$  és el diàmetre extern,  $D_{int}$  és el diàmetre intern i  $t$  és l'espessor del tanc. El pes en operació serà la suma del pes del recipient més el pes del líquid que hi ha a l'interior.

Les dades més rellevants en el càlcul de les necessitats d'emmagatzematge de l'àcid fluorhídric i del tetraclorometà, així com del catalitzador sòlid es troben resumides en la taula següent:

**Taula X – 2. Resum dels paràmetres de disseny dels tancs d'emmagatzematge.**

|                                        | <b>HF</b>   | <b>CCl<sub>4</sub></b> |
|----------------------------------------|-------------|------------------------|
| <b>Material</b>                        | <b>HDPE</b> | <b>AISI 304</b>        |
| Pressió de disseny (bar)               | 1,89        | 2,2                    |
| Temperatura de disseny (°C)            | 45          | 45                     |
| Diàmetre intern (m)                    | 3,5         | 4,5                    |
| Diàmetre extern (m)                    | 3,5         | 4,506                  |
| Alçada del cos cilíndric (m)           | 6,24        | 5,66                   |
| Alçada dels fons (m)                   | 0,31        | 0,4                    |
| Alçada total per tanc (m)              | 6,55        | 6,46                   |
| Espessor del tanc (mm)                 | 16          | 6                      |
| Volum total per tanc (m <sup>3</sup> ) | 60          | 90                     |
| Volum total (m <sup>3</sup> )          | 360         | 540                    |
| Pes per tanc (taratge, kg)             | 697         | 2.372,5                |
| Pes per tanc (en operació, kg)         | 68.561      | 116.636                |

### 10.1.3. Cubetes de retenció

Per tal de garantir els termes de seguretat en cas de vessaments, fuites de líquids, etc. en qualsevol dels tancs d'emmagatzematge de matèries primeres, cal proveir el parc de tancs amb cubetes de retenció.

L'article 13 del APQ 6 d'emmagatzematge de líquids corrosius, en relació a la distància entre els diferents recipients que puguin contenir substàncies corrosives, estableix que:

- (1) *La separació entre 2 recipients de líquids corrosius contigus ha de ser la suficient per garantir un bon accés als mateixos, amb un mínim d'1 metre de separació.*
- (2) *Els líquids corrosius que, a més, siguin inflamables o combustibles podran emmagatzemar-se juntament amb altres líquids inflamables o combustibles en les condicions esmentades en la ITC MIE-APQ 1.*
- (3) *Els líquids corrosius no inflamables ni combustibles poden emmagatzemar-se dins de les cubetes de líquids inflamables i combustibles, sempre que els materials, la protecció (excepte la protecció amb càmera*



*(4) d'escuma), la disposició i el tipus de recipients siguin els que exigeix la ITC MIE-APQ 1 a la classe de productes pels qual s'ha dissenyat la cubeta.*

Segons la normativa APQ 6, tots els tancs hauran de disposar de sistemes de ventilació o de alleujament de pressió per tal de prevenir la formació del buit o pressió interna, de tal manera que s'eviti la deformació del fons superior o de les parets dels tancs, com a conseqüència de variacions de pressió produïdes per efecte d'ompliments, buidatges, canvis de temperatura... Les sortides dels sistemes descrits han d'estar allunyades dels punts d'operació i de les vies d'accés i circulació on les persones puguin estar exposades. Com a mínim, la mida de la canonada de ventilació ha de ser igual a la major de les canonades d'ompliment o buidatge i, en cap cas, inferior a 35 mm de diàmetre intern.

La normativa APQ 6 estableix que la distància mínima horitzontal entre la paret humida dels tancs i la vora interior de la cubeta serà igual o superior a 1 metre. El fons de la cubeta haurà de tenir com a mínim un pendent de l'1%, de forma que tot el producte vessat circuli ràpidament cap al punt de recollida i posterior tractament d'efluents.

La capacitat útil de la cubeta serà, com a mínim, igual a la capacitat del recipient més gran. Quan una cubeta conté dos o més recipients, com és el cas, la seva capacitat es mesura considerant que no existeix el tanc major, però sí la resta. És a dir, descomptant el volum total de la cubeta buida i el volum de la part de cada tanc que queda submergit sota el nivell del líquid, exceptuant el del major.

Segons l'esmentada normativa, les parets i fons de la cubeta han de ser construïdes d'un material que asseguri l'estanqueïtat dels productes emmagatzemats durant el temps necessari perquè es puguin evacuar. Haurà d'haver-hi accessos normals i d'emergència degudament senyalitzats en les cubetes, amb un mínim de dos i un número tal que no s'hagi de recórrer un distància superior a 25 m fins aconseguir un accés des de qualsevol punt de l'interior de la cubeta.

Pel que fa a la normativa APQ 7 referent a líquids tòxics, cal tenir en compte els següents aspectes a l'hora d'emmagatzemar les substàncies reactives:

*(1) Els tancs d'emmagatzematge de substàncies tòxiques han d'estar proveïts d'un sistema de ventilació i alleujament de pressió d'igual manera que especifica l'APQ 6 per líquids corrosius. S'ha d'evitar sigui com sigui l'emissió a l'atmosfera de gasos*

tòxics i, en tot cas, controlar els nivells d'emissió per tal d'acomplir la normativa vigent.

- (2) *Al ser un producte d'elevada toxicitat, s'ha de considerar la necessitat de protegir, mitjançant apantallament i altres sistemes adients, aquells punts del sistema de canonades en els quals existeixi la possibilitat de projecció de líquid i es troben pròxims als punts d'operació i vies de circulació on les persones puguin estar exposades.*
- (3) *La distància mínima entre dos tancs contigus ha d'ésser 1 metre per garantir el bon accés als mateixos.*
- (4) *Els recipients per emmagatzemar líquids tòxics han de disposar d'una cubeta de retenció. No s'emmagatzemarà en la mateixa cubeta de retenció líquids tòxics i recipients de gasos a pressió ni gasos liquats.*
- (5) *En cas de recipients atmosfèrics, la distància mínima horitzontal entre la paret humida del tanc i del extrem interior de la coronació de la cubeta serà igual o superior a 1,5 metres.*
- (6) *Les cubetes hauran d'estar rodejades de carrers, mínim una quarta part de la seva perifèria. Aquests carrer tindran vies d'accés de com a mínim 2,5 m d'amplada i 4 m d'alçada mínima per facilitar el pas de vehicles d'emergència.*
- (7) *El fons de la cubeta tindrà un pendent mínim de l'1% per garantir que tot el producte que hagi vessat s'escoli ràpidament cap al punt de recollida i posterior tractament d'efluents.*
- (8) *Per evitar l'extensió de petits vessaments i reduir l'àrea d'evaporació, les cubetes que continguin diversos tancs de líquids tòxics hauran d'estar subdividits per canals de drenatge de manera que cada subdivisió contingui un únic recipient.*

Amb totes aquestes consideracions de disseny, seguint ambdues normatives, es decideix que es proveirà d'una cubeta cada grup de tancs: una cubeta pels 4 tancs d'àcid fluorhídric anhidre i una altra per als 6 tancs de tetraclorometà.

#### **10.1.3.1. Cubeta per als tancs d'àcid fluorhídric anhidre**

Els 6 tancs d'emmagatzematge d'HF anhidre es disposaran en sèrie, envoltats d'una cubeta les dimensions de la qual s'especifiquen a continuació. També s'especifica les consideracions a tenir en compte en el seu disseny, com per exemple el volum del tanc més gran i el 10% de la capacitat total dels tancs.

La cubeta estarà fabricada de polietilè d'alta densitat, igual que els tancs, per assegurar-se de que no hi ha problemes de corrosió per les possibles fuites o vessaments de líquid. Aquesta cubeta disposarà de dos accessos d'emergència i un accés normal d'entrada per als operaris. La distància entre els diferents punts d'accés no és en cap cas superior als 25 m, com indica la normativa APQ 6.

**Taula X – 3. Dades més rellevants de la cubeta de retenció dels tancs d'àcid fluorhídric.**

| Paràmetre de disseny                       | Valor |
|--------------------------------------------|-------|
| Volum tanc major (m <sup>3</sup> )         | 60    |
| 10% del volum global (540 m <sup>3</sup> ) | 36    |
| Distància entre tanc i tanc (m)            | 2     |
| Distància entre tanc i cubeta (m)          | 2     |
| Longitud de la cubeta (m)                  | 18,5  |
| Amplada de la cubeta (m)                   | 14    |
| Àrea útil de la cubeta (m <sup>2</sup> )   | 259   |
| Alçada de la cubeta (m)                    | 0,23  |
| Alçada sobredimensionada 25% (m)           | 0,29  |
| Volum total de la cubeta (m <sup>3</sup> ) | 75,11 |
| Espessor de la cubeta (m)                  | 0,25  |
| Pendent del fons de la cubeta (%)          | 2     |

A banda de la cubeta de retenció per als tancs d'àcid fluorhídric anhidre, el sistema es trobarà en un edifici tancat i refrigerat a 5-10 °C, per tal d'evitar l'emissió de vapor a l'atmosfera en cas de fuites o vessaments.

Així, sota aquestes condicions, es pot assegurar que no es formaran quantitats significants de vapor en cas d'accidents i, si es formessin, serien extretes directament pel sistema de ventilació de l'edifici refrigerat i s'enviarien a tractament de gasos.

#### **10.1.3.2. Cubeta per als tancs de tetraclorometà**

Pel que fa als 6 tancs de 90 m<sup>3</sup> de CCl<sub>4</sub>, es disposaran en dos files de 3 tancs cadascuna, separades per 3 metres de distància. Les distàncies entre cada tanc i entre les dues fileres de tancs, així com altres dades de disseny de la cubeta de retenció seguint les normatives d'APQ 6 i 7 es troben resumides a la taula següent.

La cubeta de retenció de tancs de tetraclorometà serà fabricada d'un material capaç de suportar el pes del líquid que pugui vessar i, a més, haurà de tenir un recobriment d'un

material que sigui apropiat i no reactiu amb el  $\text{CCl}_4$ . El recobriment pot ser d'acer inoxidable, el mateix material que els tancs d'emmagatzematge, o bé un altre material més barat, com per exemple el bronze, que té una bona resistència a aquest material.

El parc de tancs disposarà de dos accessos d'emergència per a vehicles especials que hagin de retirar el líquid en cas de vessament o fuga, i dues entrades normals d'accés per operaris. A més, cap entrada d'emergència estarà separada de la resta d'accessos en més de 25 m.

**Taula X – 4. Dades més rellevants de la cubeta de retenció dels tancs de tetraclorometà.**

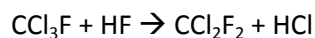
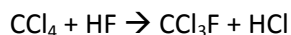
| Paràmetre de disseny                       | Valor  |
|--------------------------------------------|--------|
| Volum tanc major ( $\text{m}^3$ )          | 90     |
| 10% del volum global ( $540 \text{ m}^3$ ) | 54     |
| Distància entre tanc i tanc (m)            | 1,5    |
| Distància entre tanc i cubeta (m)          | 1,5    |
| Longitud de la cubeta (m)                  | 19,51  |
| Amplada de la cubeta (m)                   | 15     |
| Àrea útil de la cubeta ( $\text{m}^2$ )    | 292,6  |
| Alçada de la cubeta (m)                    | 0,31   |
| Alçada sobredimensionada 25% (m)           | 0,39   |
| Volum total de la cubeta ( $\text{m}^3$ )  | 114,13 |
| Espessor de la cubeta (m)                  | 0,25   |
| Pendent del fons de la cubeta (%)          | 1,5    |

## 10.2. Disseny de reactors

### 10.2.1. Reactor 1<sup>a</sup> fluoració R-201

El CFC-11 i el CFC-12 es produeix a partir de HF i  $\text{CCl}_4$  com a reactius,  $\text{SbCl}_5$  com a catalitzador i  $\text{Cl}_2$  com activador del catalitzador.

Les reaccions que tenen lloc dins del reactor són les següents i presenten l'estequiometria que es veu a continuació:



Les cinètiques d'aquestes reaccions han estat extretes de la patent "*Kinetics of tetrachloromethane fluorination by hydrogen fluoride in the presence of antimony*"

"pentachloride" on es recull tota la informació necessària d'energia d'activació, factors preexponencials i constants cinètiques per fer el correcte dimensionament del reactor.

A la següent gràfica extreta de la patent esmentada es mostra la relació entre la conversió de  $\text{CCl}_4$  al llarg del temps de reacció. Com es pot observar en la llegenda,  $\alpha_{II}$  representa la conversió de  $\text{CCl}_4$  a  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  (CFC-12) que és el que ens interessa per la nostra plana, obtenir el la màxima conversió cap a CFC-12 en aquest primer reactor, per aquest motiu s'ha dissenyat el reactor amb la finalitat que el seu temps de residència sigui superior a 2h.

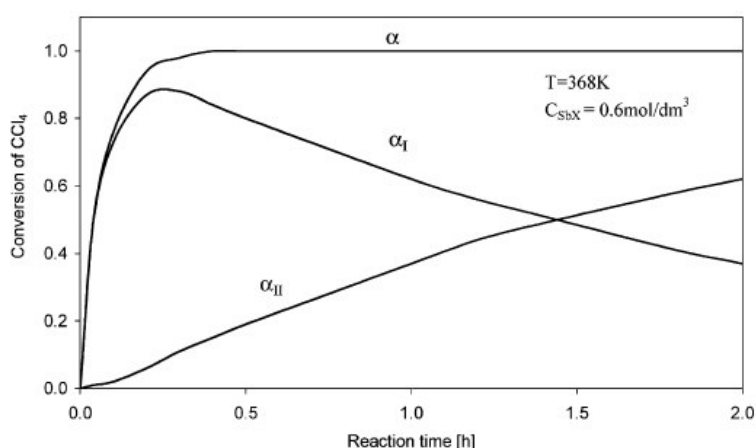


Fig. 3. The degree of  $\text{CCl}_4$  conversion as a function of the time:  $\alpha_I$ , degree of  $\text{CCl}_4$  conversion to  $\text{CCl}_3\text{F}$ ;  $\alpha_{II}$ , degree of  $\text{CCl}_4$  conversion to  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ;  $\alpha$ , total conversion.

**Figura X – 1. Grau de conversió del  $\text{CCl}_4$  en funció del temps de reacció a  $\text{CCl}_3\text{F}$ ,  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  i total.**

S'ha realitzat el càlcul del temps de residència per garantir que aquest és superior a les 2h de la següent manera:

$$\tau = \frac{V_{\text{sobredimensionat}}}{Q} \quad \text{Equació X-21}$$

$$\tau = \frac{35 \text{ m}^3}{13197.5 \text{ m}^3/\text{h}} = 4.1 \text{ h}$$

La reacció té lloc dins d'un RCTA a una temperatura de  $95,1^\circ\text{C}$  ( $368,1 \text{ K}$ ) i a una pressió de 7 atmosferes. Com que l'operació ha de ser a temperatura constant (reactor isoterm) s'ha de donar energia al reactor amb un valor de  $7,50 \cdot 10^5 \text{ KJ/h}$  perquè tot i ser reaccions exotèrmiques les que tenen lloc dins del reactor, les necessitats d'energia de vaporització necessàries pel reactiu  $\text{CCl}_4$  són major havent de donar energia al reactor.

Com que es tracta d'un equip a pressió, el disseny mecànic es calcularà segons el codi ASME (American Society of Mechanical Engineers), secció VIII, divisió 1.

## 1. VOLUM

Com que treballa a pressió de 7 atmosferes ha de ser un tanc torisfèric. A partir de les simulacions realitzades amb l'Aspen HYSYS s'ha vist que el volum del reactor òptim per la reacció és de  $V_{\text{reactor}} = 30 \text{ m}^3$  omplert al 65%, que sobredimensionant un 15%  $\rightarrow V_{\text{reactor}} = 34,50 \text{ m}^3$  aproximadament  $35 \text{ m}^3$ .

S'ha agafat una relació òptima d'altura/diàmetre tal que  $H_{\text{cilindre}} = 1,5 \cdot D_{\text{cilindre}}$  obtenint les dimensions del reactor que es presenten a continuació:

Taula X – 5. Dimensions principals del reactor R-201.

| Dimensions del reactor                  |       |
|-----------------------------------------|-------|
| Alçada cilindre (m)                     | 4,45  |
| Alçada caps torisfèrics (m)             | 1,00  |
| Alçada reactor (m)                      | 5,45  |
| Diàmetre intern (m)                     | 2,97  |
| Volum cilindre ( $\text{m}^3$ )         | 30,77 |
| Volum caps torisfèrics ( $\text{m}^3$ ) | 4,23  |
| Volum reactor ( $\text{m}^3$ )          | 35,00 |

Les equacions que s'han emprat pel dimensionament del reactor han estat:

$$V_{\text{reactor}} = V_{\text{cilindre}} + 2 \cdot V_{\text{cap torisfèric}} \quad \text{Equació X-22}$$

$$V_{\text{reactor}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{\text{cilindre}} + 2 \cdot 0,08089 \cdot D^3$$

On:  $H_{\text{cilindre}}$  és l'alçada del cilindre (m)

$D$  és el diàmetre del reactor (m)

## 2. PRESSIÓ

Per calcula la pressió de disseny que s'utilitzarà es farà la suma de la pressió d'operació de l'equip i la pressió hidrostàtica que exerceixi el líquid que aquest contingui. A aquest resultat se li afegirà un 15% per motius de seguretat o se li sumará 0.5 bars i s'agafarà el resultat més alt d'entre els dos càlculs que és la situació més desfavorable:

$$P_{\text{disseny}} = (P_{\text{operació}} + \Delta P) \cdot 1,15 \quad \text{Equació X-23}$$

$$P_{\text{disseny}} = P_{\text{operació}} + \Delta P + 0.5 \quad (\text{en bars}) \quad \text{Equació X-24}$$

I la pressió hidrostàtica del líquid,  $\Delta P$  es calcula amb l'equació X-4.

Finalment s'obté una  $P_{\text{disseny}} = 8,693 \text{ bar} = 8,70 \text{ bar} = 216,18 \text{ psi}$

### 3. LÍMIT ELÀSTIC

Segons el tipus de material de construcció de l'aparell a pressió i de la temperatura d'operació a la que opera l'equip, el límit elàstic del material emprat varia.

Dins del reactor hi intervenen substàncies altament corrosives com és el HF i el HCl de manera que el material emprat ha de ser resistent per ambdós compostos. Com el reactor precisa d'escalfament extern per tal de que les reaccions tinguin lloc, l'ús d'un polímer com podria ser el tefló només pot ésser emprat com a recobriment d'un acer inoxidable ja que és aïllant tèrmic i un gruix elevat d'aquest dificultaria molt l'escalfament del reactor. Tot i això, fent recerca bibliogràfica s'ha vist que aquest polímer pot presentar una petita permeabilitat a l'HF fet que provocaria la ràpida corrosió de l'inoxidable. Per aquest motiu, és una bona decisió la de construir el reactor amb Hastelloy C-22.

A la taula següent es mostra els límits elàstics del material Hastelloy C-22 proporcionats per l'empresa Haynes International.

Taula X – 6. Paràmetres mecànics per al Hastelloy C-22.

| AVERAGE TENSILE DATA, SOLUTION HEAT-TREATED               |                  |       |                                       |                                           |                                        |
|-----------------------------------------------------------|------------------|-------|---------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| Form                                                      | Test Temperature |       | Ultimate<br>Tensile Strength,<br>Ksi* | Yield Strength<br>at 0.2% Offset,<br>Ksi* | Elongation in<br>2 in. (50.8 mm),<br>% |
|                                                           | °F               | °C    |                                       |                                           |                                        |
| Sheet,<br>0.028 - 0.125 in.<br>(0.71 - 3.2 mm)<br>thick** | Room             |       | 116                                   | 59                                        | 57                                     |
|                                                           | 200              | (93)  | 110                                   | 54                                        | 58                                     |
|                                                           | 400              | (204) | 102                                   | 44                                        | 57                                     |
|                                                           | 600              | (316) | 98                                    | 42                                        | 62                                     |
|                                                           | 800              | (427) | 95                                    | 41                                        | 67                                     |
|                                                           | 1000             | (538) | 91                                    | 40                                        | 61                                     |
|                                                           | 1200             | (649) | 85                                    | 36                                        | 65                                     |
|                                                           | 1400             | (760) | 76                                    | 35                                        | 63                                     |

\* Ksi can be converted to MPa (megapascals) by multiplying by 6.895.

\*\* Average of 10-20 tests. \*\*\* Average of 16-32 tests. \*\*\*\* Average of 8-16 tests.

A la temperatura a la que treballa el reactor (95,1°C) el límit elàstic del material seria de 110 ksi però cal tenir en compte que en algun moment donat la temperatura d'aquest pot

augmentar i assolir una temperatura superior a aquesta. Així que per motius de seguretat s'agafa **S=102 ksi=102.000 psi** que és la corresponent a una temperatura de 204°C.

#### 4. FACTOR DE SOLDADURA

El mètode d'unió entre xapes emprat en els equips que treballen a pressió és la soldadura i és una zona considerada com a dèbil ja que representa una discontinuïtat que pot presentar defectes. Per aquest motiu, en el càlcul dels equips s'ha d'introduir una reducció del límit elàstic multiplicant aquest per un coeficient que s'anomena factor de soldadura (E) que presenta un valor de **E=0,85** si se suposa que el radiografiat realitzat és parcial.

Els tipus de soldadura emprats per el material escollit (Hastelloy C-22) són a partir d'un arc de tungstè gas (GTAW), un arc de gas metàl·lic (GMAW) i arc metàl·lic protegit (SMAW).

**Taula X – 7. Paràmetres mecànics de les soldadures de Hastelloy.**

| Average Tensile Data, All-Weld Metal* |                  |       |                                  |                                      |                                  |
|---------------------------------------|------------------|-------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Weld Type                             | Test Temperature |       | Ultimate Tensile Strength, Ksi** | Yield Strength at 0.2% Offset, Ksi** | Elongation in 2 in. (50.8 mm), % |
|                                       | °F               | °C    |                                  |                                      |                                  |
| GTAW                                  | Room             |       | 113                              | 76                                   | 47                               |
|                                       | 500              | (260) | 94                               | 60                                   | 52                               |
|                                       | 1000             | (538) | 87                               | 57                                   | 51                               |
| GMAW (short arc)                      | Room             |       | 113                              | 72                                   | 52                               |
|                                       | 500              | (260) | 94                               | 60                                   | 52                               |
|                                       | 1000             | (538) | 84                               | 54                                   | 55                               |
| SMAW                                  | Room             |       | 110                              | 74                                   | 47                               |
|                                       | 752              | (400) | 87                               | 56                                   | 49                               |

\*Average of 10-20 tests. \*\*Ksi can be converted to MPa (megapascals) by multiplying by 6.895.

Observant la taula es pot veure que les millors soldadures en quan al límit elàstic del material són la GTAW i la GMAW ja que la pressió que poden suportar és major, poden suportar una pressió de **94 ksi = 94.000 psi**, una mica inferior al que suporta el material ja que, com s'ha esmentat, és una zona considerada dèbil degut a les discontinuïtats que pot presentar.

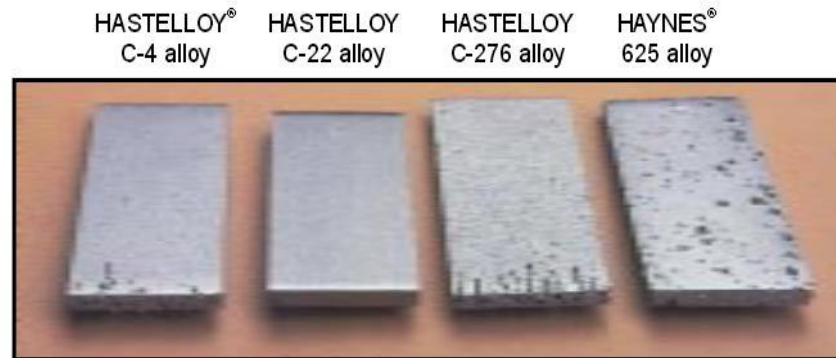
Tot i tenir els valors de la taula (fesf) s'aplica el factor de soldadura sobre el límit elàstic del material ja que el valor resultant és més desfavorable que el donat per el fabricant. De manera que la zona debilitada per la soldadura presentarà un **límit elàstic = 86,7 ksi = 86.700 psi**.

#### 5. SOBRESPESSOR DE CORROSIÓ



La sobreesspessor de corrosió es determina per tal de compensar la corrosió que pateixen els equips tot i que el material no sofreixi corrosió per part dels fluids que entra en contacte, aquest és el cas del Hastelloy C-22 .

### HASTELLOY® C-22® alloy Excels in Pitting Resistance



**Figura X – 2. Corrosió associada a solucions àcides per al Hastelloy C-22.**

A la figura anterior es pot veure la corrosió d'una solució de 12% d'HCl i 11,5% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 125°C sobre diferents tipus d'aliatges de Hastelloy on es pot veure que el tipus C-22 és el més resistent, per aquest motiu ha estat triat. Pel que fa l'HF, l'aliatge C-22 també és el que presenta una millor resistència a la corrosió d'aquest.

Segons el codi ASME s'ha de calcular el sobreesspessor a partir de la corrosió que pot experimentar el material al llarg de 10 anys. En el cas del Hastelloy C-22, la corrosió que experimenta en funció de l'HF i l'HCl és molt més elevada si aquests es troben en contacte amb aigua. Com que aquest no és el cas, es pot establir a partir dels valors trobats al llibre "Corrosion Resistance of Hastelloy alloys" de la mateixa empresa Haynes International, Inc. que la resistència a la corrosió respecte aquests dos components altament corrosius és bona, és a dir, 0,25 mm/any.

Per qüestions de seguretat, s'ha suposat que en algunes condicions de treball la resistència del material a la corrosió podria disminuir i per tant s'ha agafat el valor de 0.51 mm/any suposant que la resistència seria satisfactòria. De manera que el màxim espessor corroït en 10 anys té un valor de C1 = 5,1 mm per tant, posant un sobreesspessor de **6 mm** l'equip estaria preparat per operar durant 12 anys.

## 6. FACTOR M

El factor M mostra la relació entre els radis que conformen el fons toriesfèric de l'equip: el radi d'artells (knuckle radius, r) i el radi interior del cap (R). En la majoria d'equips toriesfèrics s'utilitza la relació  $L = 10 \cdot r$  de manera que el valor **M = 1,54**.

## 7. GRUIX DEL REACTOR

Un cop calculats tots els paràmetres necessaris pel codi ASME es pot procedir al càlcul del gruix de les parets del reactor. S'ha de calcular per separat el gruix del cilindre del gruix dels caps toriesfèrics sabent la pressió de disseny de l'equip. Seguidament s'apliquen les següents equacions X-18 i 19.

Com el gruix calculat a partir de l'equació pel cap toriesfèric és major que el del cilindre, s'agafa aquest gruix per tot el reactor per motius de seguretat.

## 8. BESCANVI DE CALOR

### Càlcul de l'energia necessària a subministrar al reactor (q)

S'ha realitzat un càlcul de l'entalpia de reacció per tal de saber l'energia que s'haurà de subministrar al reactor.

$$\Delta H_{reacció} = H_{productes} - H_{reactius} \quad \text{Equació X-25}$$

$$H_{compost} = H_{compost}^{\circ} + C_p \cdot \int_{25}^{91,5} dT + C_v \cdot \int_1^7 dP \quad \text{Equació X-26}$$

On: H és l'entalpia del compost (KJ/mol)

$C_p$  és la calor específica mitjana a pressió constant (KJ/mol·K)

$C_v$  és la calor específica mitjana a volum constant (KJ/mol·K)

T és la temperatura dins l'interval de 25°C i la del reactor, 95.1°C (°C)

P és la pressió dins l'interval de pressió de 1atm a 7atm (atm)

De forma simplificada, no es considerarà el terme de la calor específica mitjana a volum constant tot i que en el cas dels gasos s'hauria de tenir en compte, perquè la calor que s'ha de donar al reactor se sobredimensionarà aplicant l'equació següent:

En el cas que un compost canviï d'estat, com és el cas del  $\text{CCl}_4$ , s'ha de tenir en compte l'energia que absorbeix per passar a gas, en aquest cas concret l'equació emprada serà:

$$H_{compost} = H^{\circ} + C_p \cdot (T_{reactor,95,1^{\circ}C} - T_{std,25^{\circ}C}) \quad \text{Equació X-27}$$

Els valors emprats es presenten a continuació:

**Taula X – 8. Valors d'entalpies de formació, calors específics i entalpies de formació dels compostos involucrats en la primera reacció.**

|                                 | $\Delta H_f 25$ (KJ/mol) | Cp mitjana (J/mol·K) | Cp mitjana (KJ/mol·K) | $\Delta H$ formació (KJ/mol) |
|---------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|
| CCl <sub>4</sub>                | -100,48                  | 86,867               | 0,0869                | -94,3907                     |
| HF                              | -271,3                   | 29,149               | 0,0292                | -269,2567                    |
| CCl <sub>3</sub> F              | -284,7                   | 80,987               | 0,0810                | -279,0228                    |
| HCl                             | -92,36                   | 29,141               | 0,0291                | -90,3172                     |
| CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> | -481,48                  | 75,706               | 0,0758                | -476,1730                    |

S'ha aplicat per cada una de les reaccions que tenen lloc dins del reactor l'equació anterior, obtenint un valor d'entalpia de reacció negatiu (reaccions exotèrmiques).

$$\Delta H_{reacció 1} = -5,693 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta H_{reacció 2} = -18,211 \text{ KJ/mol}$$

Per últim, com que el reactiu CCl<sub>4</sub> experimenta un canvi d'estat (es vaporitza) absorbeix calor cedida per les dues reaccions havent d'aportar finalment calor al reactor:

$$q = \Delta H_{reacció 1} + \Delta H_{reacció 2} + \Delta H_{vaporització} \quad \text{Equació X-28}$$

$$q = (-5,693) + (-18,211) + 30,019 = 6,116 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

NOTA. S'ha agafat la contribució de les dues reaccions per igual (100% de conversió) tot i no ser real per tal de sobredimensionar els equips per aportar calor al reactor.

Sabent el cabal molar que entra dins del reactor es determina un cabal de calor a aportar de:  
 **$q=7,50 \cdot 10^5$  KJ/h.**

#### Càlcul del coeficient global de transferència de calor (U)

El reactor dissenyat precisa de necessitats calorífiques pel seu correcte funcionament, degut a les dimensions que presenta l'equip s'ha decidit utilitzar un sistema de mitja canya utilitzant com a fluid oli tèrmic per motius de seguretat.

El fluid tèrmic emprat s'anomena DOWTHERM\* J (dietilbenzè) que ha estat seleccionat pel seu extens rang de temperatures (des de -81°C fins a 181°C), tan pot servir com a refrigerant o com a fluid tèrmic. Es produeix a la companyia "The Dow Chemical Company" a Estats Units i tota la informació emprada ha sigut extreta de la seva fitxa de dades de seguretat.

Coneixent el tipus de fluid que circula a l'interior del reactor, l'oli tèrmic que es vol emprar per l'escalfament d'aquest i el material de construcció del reactor, es pot calcular un valor aproximat de  $U$ . Els valors bibliogràfics emprats han sigut extrets de la pàgina: <http://www.hcheattransfer.com/coefficients.html>, suposant la dissolució de dins el reactor amb una  $h$  típica per solvents orgànics que evaporen, l'oli tèrmic com a oli sense canvi d'estat i pel material els valors típics cedits per la casa productora de Hastelloy.

**Taula X – 9. Valor del coeficient individual de transferència de calor de la dissolució i l'oli tèrmic.**

|            | <b><math>h</math> (BTU/h·ft<sup>2</sup>·K)</b> |              | <b><math>h</math> (W/m<sup>2</sup>·K)</b> |
|------------|------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------|
| Dissolució | 200                                            | de 100 a 300 | 0,0869                                    |
| Oli tèrmic | 65                                             | de 10 a 120  | 0,0758                                    |

A partir dels valors presentats a la taula anterior, la conducció del Hastelloy (11 W/m·K) i el gruix calculat pel reactor, s'ha calculat el coeficient global de transferència de calor ( $U$ ) a partir de la següent equació:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_L} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_S} \quad \text{Equació X-29}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{1,136} + \frac{0,0093}{11} + \frac{1}{370} \rightarrow U = 225,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

On:  $h_L$  = coeficient individual de transmissió de calor del líquid dins del reactor (W/m<sup>2</sup>·K)

$\Delta x$  = gruix del reactor (m)

$k$  = conductivitat tèrmica del material del reactor Hastelloy (W/m·K)

$h_S$  = coeficient individual de transmissió de calor de l'oli tèrmic (W/m<sup>2</sup>·K)

#### Càlcul del cabal d'oli tèrmic ( $m$ )

Com que no hi ha canvi d'estat en el fluid tèrmic dins del rang de temperatures en que varia, l'equació emprada per calcular el cabal màssic necessari per escalfar el reactor nom és té en compte la calor sensible. Els valors emprats pel fluid tèrmic Dowtherm J han estat cedits per l'empresa The Dow Chemical Company i s'ha efectuat la mitjana de les calors latents dins del rang. Amb l'equació X-12 es pot calcular el cabal màssic necessari de dowtherm.

$$m = \frac{7,5 \cdot 10^5 \text{ KJ/h}}{2,224 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot K} \cdot (150 - 120)K} = 11.244 \text{ Kg/h}$$

Càlcul de l'àrea necessària (A) i el radi (r)

S'ha de donar una calor (q) de  $7,50 \cdot 10^5 \text{ kJ/h} = 2,08 \cdot 10^5 \text{ W}$  necessitant així una àrea per realitzar el bescanvi calculada amb l'equació X-8:

S'ha establert que el salt tèrmic de l'oli tèrmic serà de  $30^\circ\text{C}$ , entrant a una temperatura de  $150^\circ\text{C}$  i sortint a  $120^\circ\text{C}$  per tal de mantenir el reactor a una temperatura isoterma de  $95,1^\circ\text{C}$ . La diferència de temperatura mitjana logarítmica és la següent, calculada amb l'expressió X-9

$$\Delta T_{ml} = \frac{(150 - 95,1) - (120 - 95,1)}{\ln\left(\frac{150 - 95,1}{120 - 95,1}\right)} = 37,95 \rightarrow A = \frac{q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{2,08 \cdot 10^5 \text{ W}}{225,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 37,95 \text{ K}} = 24,36 \text{ m}^2$$

Sabent l'àrea total d'intercanvi es pot prosseguir al càlcul del diàmetre i la llargada de la mitja canya a partir de la següent equació a partir del cabal volumètric de l'oli tèrmic ( $m = 11.244 \text{ Kg/h} = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ ). La velocitat del fluid s'ha determinat a partir del document *DOWTHERM J Heat Transfer Fluid* de la mateixa empresa on estableix valors típics de velocitat per aquest tipus d'oli d'entre 2 i 4 m/s, s'agafa 2 m/s.

$$Q_L = v \cdot S \rightarrow S = \frac{Q_L}{v} \quad \text{Equació X-30}$$

$$S = \frac{3,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m/s}} = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

On:  $Q_L$  és el cabal volumètric del fluid tèrmic ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$v$  és la velocitat típica del fluid dins de la canonada (m/s)

$S$  és la superfície de la canonada per on circula el fluid

Així doncs, el radi de la canonada tenint en compte que només intercanvia calor la meitat de la mitja canya es calcula:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{2 \cdot S}{\pi}} \quad \text{Equació X-31}$$

$$r = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,97 \cdot 10^{-3}}{\pi}} = 0,035 \text{ m} = 35 \text{ mm}$$

Calculant la llargada de la mitja canya amb la següent expressió emprant l'àrea total de bescanvi:

$$A = \pi \cdot D_{tub} \cdot L \rightarrow L = \frac{A}{\pi \cdot D_{tub}} \quad \text{Equació X-32}$$

$$L = \frac{30,14 \text{ m}^2}{\pi \cdot 2 \cdot 0,035 \text{ m}} = 137 \text{ m}$$

#### Número de voltes (n) i distància entre els tubs ( $\theta_L$ )

El radi de la mitja canya ha de ser de 0,035m i ha de presentar un gruix calculat a partir del codi ASME per aquest reactor de 3,33mm.

L'amplada d'una de les voltes del reactor es calcula a partir del diàmetre intern del reactor tenint en compte el seu gruix tal com es mostra en la següent equació

$$L_{volta} = (2 \cdot \text{gruix}_{\text{paret}} + D_{\text{intern}}) \cdot \pi \quad \text{Equació X-33}$$

$$L_{volta} = (2 \cdot 3,33 \text{ mm} + 2,97 \text{ m}) \cdot \pi = 9,36 \text{ m aproximadament}$$

El número de voltes de la mitja canya es determina com:

$$n = \frac{L}{L_{volta}} \quad \text{Equació X-34}$$

$$n = \frac{137 \text{ m}}{9,36 \text{ m}} = 15 \text{ voltes}$$

La distància entre els tubs de la mitja canya es determina tenint en compte l'àrea total del cilindre del reactor on hi ha el líquid perquè quedi al màxim de repartida i hi hagi un bon bescanvi.

$$\theta_L = \frac{h_{\text{liquid reactor}} - n \cdot D_{tub}}{n-1} \quad \text{Equació X-35}$$

$$\theta_L = \frac{0,65 \cdot 5,45 \text{ m} - 15 \cdot 2 \cdot 0,035 \text{ m}}{15 - 1} = 0,18 \text{ m} = 18 \text{ cm}$$

Tot i això, el reactor estarà totalment recobert per tubs per tal de garantir la temperatura en tot el reactor, sent així un total de voltes:

$$h_{\text{restant}} = h_{\text{cilindre}} - n \cdot (D_{tub} + \theta_L) \quad \text{Equació X-36}$$

$$h_{\text{restant}} = 5,45 - 15 \cdot (0,070 + 0,18) = 1,70 \text{ m}$$

$$n_{\text{voltes restants}} = \frac{h_{\text{restant}}}{D_{tub} + \theta_L} \quad \text{Equació X-37}$$

$$n_{voltes\ restants} = \frac{1,70\ m}{0,070\ m + 0,18} = 7\ voltes$$

És a dir, en total 22 voltes al voltant del reactor isoterma.

### Aïllament tèrmic

L'aïllament tèrmic s'ha calculat a partir d'un programa de càlcul tenint en compte com si el reactor tingués la mateixa conductivitat tèrmica que un acer inoxidable AISI 304L per limitacions del programa, tot i així les seves conductivitats no difereixen en excés.

S'ha determinat un aïllament de llana de roca de 3.5 polsades (0,089 m) on la seva superfície externa té una temperatura de 35°C evitant així qualsevol perill ja sigui pels operaris o per problemes amb altra maquinària de la zona. Aquest aïllament estarà recobert per una planxa de AISI 304 perquè no quedi a la vista.

## 9. AGITACIÓ

Per tal de garantir una bona homogeneïtzació dels reactius que entren dins del reactor i bona transferència de calor, s'ha determinat que la millor agitació s'obtingria a partir de turbines de disc (Flat disc turbine) ja que generen un flux radial disposades de la següent forma:

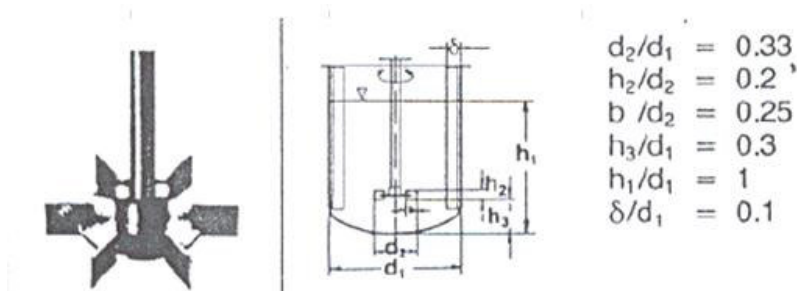


Figura X – 3. Turbines de tipus flat disc.

Mitjançant les relacions establertes en la figura anterior s'ha pogut determinar els següents paràmetres:

Taula X – 10. Paràmetres de disseny de l'agitador AG-201.

| Dimensions agitador (m) |    |       |
|-------------------------|----|-------|
| Diàmetre intern         | d1 | 2,967 |
| Diàmetre agitador       | d2 | 0,979 |
| Gruix pales agitador    | h2 | 0,196 |
| Longitud pales agitador | b  | 0,245 |

|                          |          |       |
|--------------------------|----------|-------|
| Distància fons           | h3       | 0,890 |
| Distància segon agitador | h1       | 2,967 |
| Gruix baffles            | $\delta$ | 0,297 |
| Alçada agitador          | h        | 4,560 |

Per tant, el reactor constarà de 2 baffles al costat amb la finalitat de dirigir el flux del fluid per obtenir el màxim rendiment i quatre turbines de disc agrupades dos a dos per garantir l'agitació abans esmentada.

Pel que fa referència a la potència d'agitació, s'ha agafat un valor típic corresponent a una agitació mitjana ja que ens garanteix una bona transferència de calor i una bona homogeneïtzació entre els líquids d'entrada. Una agitació superior a aquesta, és a dir, una agitació severa, podria causar la dissolució dels productes gasosos de la reacció amb els reactius en fase líquida cosa que desafavoriria la separació i el rendiment del reactor. Els valors típics s'han extret de la següent taula:

Table 10.14. Power requirements—baffled agitated tanks

| Agitation | Applications           | Power, kW/m <sup>3</sup> |
|-----------|------------------------|--------------------------|
| Mild      | Blending, mixing       | 0.04–0.10                |
|           | Homogeneous reactions  | 0.01–0.03                |
| Medium    | Heat transfer          | 0.03–1.0                 |
|           | Liquid-liquid mixing   | 1.0–1.5                  |
| Severe    | Slurry suspension      | 1.5–2.0                  |
|           | Gas absorption,        | 1.5–2.0                  |
|           | Emulsions              | 1.5–2.0                  |
| Violent   | Fine slurry suspension | >2.0                     |

Figura X – 4. Potència requerida, en kW/m<sup>3</sup>, en funció de la necessitat d'agitació.

De manera que s'ha calculat la potència a partir del volum de líquid dins del reactor:

$$P (W) = P \left( \frac{W}{m^3} \right) \cdot V_{liquid} (m^3) \quad \text{Equació X-38}$$

$$P = 1000 \frac{W}{m^3} \cdot 22,5 m^3 = 22.500 W$$

Seguidament s'ha calculat el Reynolds a partir de la velocitat del fluid dins del reactor tenint en compte les propietats dels components a la temperatura de treball (95.1°C):

$$\tau = \frac{D_{intern}}{v_{fluid}} \rightarrow v_{fluid} = \frac{D_{intern}}{\tau} \quad \text{Equació X-39}$$



$$v_{fluid} = \frac{2,967 \text{ m}}{14.743,7 \text{ s}} = 0,0002 \text{ m/s}$$

NOTA: És una velocitat molt baixa degut a que el fluid està molt temps dins del reactor per afavorir la conversió.

$$Re = \frac{D_{intern} \cdot v_{fluid} \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Equació X-40}$$

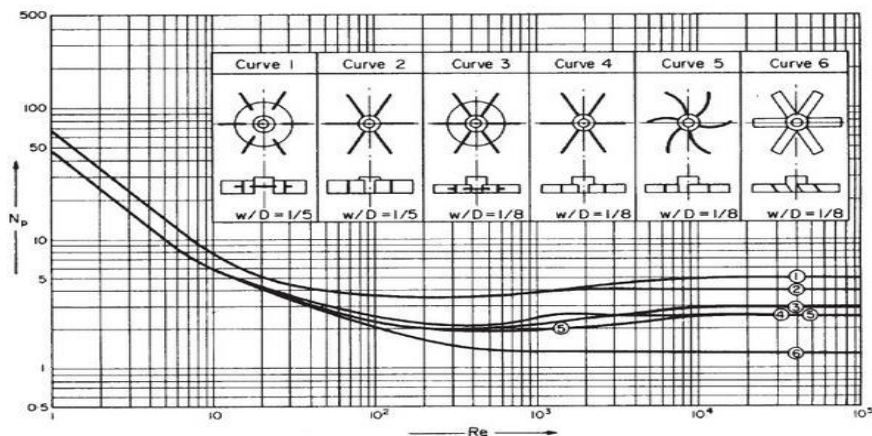
$$Re = \frac{2,967 \text{ m} \cdot 0,0002 \text{ m/s} \cdot 1.433 \text{ kg/m}^3}{0,0002979 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 2,87 \cdot 10^3$$

A partir d'aquest valor de Reynolds obtingut que indica la naturalesa d'un règim de transició molt proper al turbulent dins del reactor i aplicant l'equació que es presenta a continuació, es pot determinar la velocitat d'agitació:

$$Re = \frac{D_{agitador}^2 \cdot v_{agitació} \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Equació X-41}$$

$$v_{agitació} = \frac{2,87 \cdot 10^3 \cdot 0,0002979 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{(0,979 \text{ m})^2 \cdot 1.433 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 6,23 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

Seguidament es fa ús de la taula a continuació per relacionar-ho amb el número de potència (Np) que varia segons el tipus d'agitador emprat:



**Figura X – 5. Gràfic per trobar el número de potència mitjançant el tipus d'agitador i els Reynolds.**

En el nostre cas es tracta, com ja s'ha dit, d'una turbina de disc (corba 1), a partir del valor de Reynolds calculat es pot determinar un valor de Np (número de potència).

El número de voltes de l'agitador es calcula amb l'equació següent:

$$N = \sqrt[3]{\frac{P}{D_{agitador}^5 \cdot Np \cdot \rho}} \quad \text{Equació X-42}$$

$$N = \sqrt[3]{\frac{22.500 \text{ W}}{(0,979 \text{ m})^5 \cdot 4,5 \cdot 1.433 \text{ kg/m}^3}} = 1,57 \text{ s}^{-1} = 94,3 \text{ rpm}$$

De manera que l'agitació del reactor serà de 95 rpm a una potència de 22.500 W.

#### 10 PES DEL REACTOR

Per tal de tarar reactor cal saber el pes de Hastelloy C-22 que s'utilitzarà. Com que es tracta d'un reactor torisfèric, es pot utilitzar les equacions X-14, 15 i 20 per calcular el pes del reactor, obtenint-se els següents resultats:

Volum cilindre:  $0,137 \text{ m}^3$ . Volum fons torisfèrics:  $0,015 \text{ m}^3$ . Pes total del reactor: 1.453,4 kg.

La densitat del Hastelloy C-2, que permet calcular el pes del reactor, és de  $8.690 \text{ kg/m}^3$ .

Sobredimensionant el pes del reactor amb un 15% degut a la mitja canya i l'agitador no comptabilitzats en el càlcul s'obté un pes final de reactor de 1.671,4 kg de Hastelloy C-22.

A part del pes del reactor, s'ha de tenir en compte el pes de l'aïllant tèrmic i el recobriment d'acer comercial

#### Aïllament tèrmic

$$V_{aïllant, \text{ cilindre}} = \pi \cdot (D_{extern} + 2 \cdot Gruix_{aïllant}) \cdot h_{cilindre} \quad \text{Equació X-42}$$

$$V_{aïllant, \text{ cilindre}} = \pi \cdot (2,974 \text{ m} + 2 \cdot 0,089 \text{ m}) \cdot 4,451 \text{ m} \cdot 0,089 \text{ m} = 0,658 \text{ m}^3$$

$$V_{aïllant, \text{ cap torisfèric}} = 0,081 \cdot ((D_{extern} + 2 \cdot Gruix_{aïllant})^3 - D_{extern}^3) \quad \text{Equació X-43}$$

$$V_{aïllant, \text{ cap torisfèric}} = 0,081 \cdot [(2,974 \text{ m} + 2 \cdot 0,089)^3 - (2,974 \text{ m})^3] = 0,406 \text{ m}^3$$

$$Pes_{aïllant} = (V_{aïllant, \text{ cilindre}} + 2 \cdot V_{aïllant, \text{ cap torisfèric}}) \cdot \rho_{llana \text{ de roca}} \quad \text{Equació X-45}$$

$$Pes_{aïllant} = (0,658 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,406 \text{ m}^3) \cdot 80 \text{ kg/m}^3 = 117,6 \text{ kg}$$

#### Recobriment acer comercial

Pel que fa la planxa que recobreix l'aïllant tèrmic per seguretat, tindrà tan sols 0.6 mm ja que la seva funció, abans esmentada, és la de recobrir l'aïllant.

$$V_{\text{AISI 304, cilindre}} = \pi \cdot D_{\text{extern aïllant}} \cdot h_{\text{cilindre}} \cdot \text{Gruix}_{\text{AISI 304}} \quad \text{Equació X-46}$$

$$V_{\text{AISI 304, cilindre}} = \pi \cdot (2,974 \text{ m} + 2 \cdot 0,089 \text{ m}) \cdot 4,451 \text{ m} \cdot 0,0006 \text{ m} = 0,026 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{AISI 304, cap toriesfèric}} = 0,081 \cdot \left( (D_{\text{extern aïllant}} + 2 \cdot \text{Gruix}_{\text{AISI 304}})^3 - D_{\text{extern aïllant}}^3 \right)$$

$$\text{Equació X-47}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{AISI 304, cap toriesfèric}} &= 0,081 \cdot [(2,974 \text{ m} + 2 \cdot 0,089 + 2 \cdot 0,0006 \text{ m})^3 - (2,974 \text{ m} + 2 \cdot 0,089)^3] \\ &= 0,003 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$P_{\text{esAISI 304}} = (V_{\text{AISI 304, cilindre}} + 2 \cdot V_{\text{AISI 304, cap toriesfèric}}) \cdot \rho_{\text{AISI 304}} \quad \text{Equació X-48}$$

$$P_{\text{esAISI 304}} = (0,26 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0,003 \text{ m}^3) \cdot 7.930 \text{ kg/m}^3 = 255,7 \text{ kg}$$

Finalment, es pot determinar el taratge total del reactor 2044,7 kg. El pes d'operació, en canvi, es calcula amb l'expressió següent

$$P_{\text{esoperació}} = \text{taratge} + P_{\text{eslíquid}} \quad \text{Equació X-49}$$

$$P_{\text{esoperació}} = 2.044,7 \text{ kg} + 32.242,5 \text{ kg} = 34.287,2 \text{ kg}$$

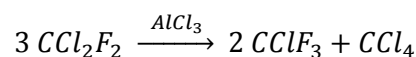
$$P_{\text{eslíquid}} = 22,5 \text{ m}^3 \cdot 1.433 \text{ kg/m}^3 = 32.242,5 \text{ kg}$$

De manera que el pes d'operació és de 34.287,2 kg.

### 10.2.2. Reactor 2<sup>a</sup> fluoració R-401 i R-402

#### Introducció

En el segon reactor es duu a terme la segona fluoració, fent reaccionar el diclorodifluorometà,  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , en presència del catalitzador  $\text{AlCl}_3$ , per tal d'obtenir el producte clorotrifluorometà,  $\text{CClF}_3$ , generant-se també tetraclorometà:



No es tindran en compte altres reaccions, com per exemple la formació de  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  i  $\text{CClF}_3$  a partir del triclorofluorometà,  $\text{CCl}_3\text{F}$ , perquè la composició d'entrada del segon reactor és de més del 99,5 % màssic de  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , amb un 0,01 % de  $\text{CCl}_3\text{F}$  (0,275 kg/h). Per tant, es menysprea la reacció del  $\text{CCl}_3\text{F}$  i només es considera la interacció del diclorodifluorometà amb les partícules catalítiques d' $\text{AlCl}_3$ .

Aquest catalitzador estarà al segon reactor amb una relació màssica de 0,35 kg de gas d'entrada reactiu per kg d' $\text{AlCl}_3$  i per hora. Tenint en compte que al segon reactor entren 2.750 kg/h de mescla de gasos, es necessiten 7,86 tones de clorur d'alumini.

La vida útil d'aquest catalitzador és de 3 mesos; es desactiva totalment al cap de tres mesos, per tant podem suposar que es desactiva al voltant d'un 33% al cap d'un mes. Es decideix que es renovarà el catalitzador del segon reactor cada mes, ja que no s'accepta una activitat catalítica menor durant la segona reacció. Així, seran necessaris unes 94,32 tones de  $\text{AlCl}_3$  a l'any per tal de produir les 10.000 tones de CFC-13.

### Consideracions de disseny

El segon reactor opera a 125 °C de manera isoterma, amb una pressió d'entrada i sortida iguals a la pressió atmosfèrica.

Com el catalitzador es troba en estat sòlid i el reactiu i els productes formats en fase gas, s'ha decidit dissenyar el reactor com un llit fix, considerant la desactivació del catalitzador i la pèrdua de pressió per unitat d'alçada de la massa de catalitzador.

Per saber la caiguda de pressió en el llit catalític, s'utilitza l'equació d'Ergun; es mostra a continuació:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right) \cdot \frac{d_p}{\rho \cdot v_s^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = \frac{150 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \mu}{\rho \cdot v_s \cdot d_p} + 1,75 \quad \text{Equació X-50}$$

On  $\frac{\Delta P}{L}$  és la diferència de pressió per unitat de longitud del llit catalític, en Pa/m;  $d_p$  és el diàmetre de les partícules de catalitzador, en m;  $\mu$  és la viscositat dinàmica del gas, en kg/m·s;  $\rho$  és la densitat del gas, en kg/m<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  és la fracció buida del llit fix i  $v_s$  és la velocitat superficial del fluid, calculada com el cabal volumètric de gas per nombre de tubs(Q, m<sup>3</sup>/s) que creua el reactor entre la secció de pas, igual a  $A = \frac{\pi}{4} D t^2$ , on Dt és el diàmetre dels tubs per on passa el gas.

A continuació es mostra una taula resum dels paràmetres utilitzats i el valor obtingut de la pèrdua de càrrega per unitat de longitud en cadascun dels tubs del reactor:

**Taula X – 11a. Paràmetres de disseny del llit fix del reactor.**

| Paràmetre                                 | Valor |
|-------------------------------------------|-------|
| Diàmetre partícules, $d_p$ (m)            | 0,005 |
| Densitat gas, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 3,734 |
| Fracció buida del llit, $\varepsilon$     | 0,50  |

|                                                               |                      |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|
| Viscositat dinàmica gas, $\mu$ (kg/m·s)                       | $1,70 \cdot 10^{-5}$ |
| Cabal volumètric gas, Q (m <sup>3</sup> /s)                   | 0,206                |
| Diàmetre columna, D (m)                                       | 1,70                 |
| Velocitat superficial gas tubs, $v_s$ (m/s)                   | 0,10                 |
| Pèrdua de pressió per unitat de longitud, $\Delta P/L$ (Pa/m) | 98,02                |
| Longitud del llit, L (m)                                      | 4                    |

Es veu clarament com la pèrdua de pressió en el llit catalític és menyspreable, donades les condicions de disseny esmentades.

Pel que fa a la desactivació del catalitzador sabem que, en 3 mesos, el catalitzador queda totalment desactivat. Per tant, en un mes aproximadament es tindrà una reducció d'un terç de l'activitat catalítica. Tenint en compte la curta durada del catalitzador, no seria pràcticament industrialment crear un sistema de regeneració del catalitzador al reactor de manera continua. Així, caldrà duplicar el sistema de reacció, per tal de mantenir contínua la producció de  $\text{CClF}_3$  i poder anar renovant la massa de catalitzador necessària.

Cada mes, operarà un dels reactors, mentre en l'altre serà renovat el llit fix de catalitzador, enviant al tractament necessari el llit fix anterior, amb un alt contingut en  $\text{AlF}_3$ . Caldrà fer un assecat exhaustiu després de netejar el reactor i mantenir-lo amb nitrogen per tal d'evitar un ambient humit abans de la seva posta en operació.

### Disseny del reactor

Els reactors es fabricaran d'acer inoxidable AISI 316L, un aliatge de ferro amb un mínim del 10,5% en crom, amb una resistència a la tracció de 460-860 MPa. És un aliatge indicat per a la segona reacció del procés, donat que les substàncies involucrades no suposen perills greus de corrosió, inflamabilitat, etc. A més, la versió de l'acer inoxidable 316L redueix la tendència dels recipients a esquarterar-se després de la soldadura, fent-lo més adient per a la fabricació del reactor que no pas l'AISI 316 ó 304L.

Cal tenir en compte, però, que el catalitzador sòlid pot ser corrosiu en algunes condicions, com per exemple quan es troba hidratat (durant el procés s'evita al màxim aquest esdeveniment). Per aquest motiu, es col·locarà aquest catalitzador en una matriu de sílice gel, per tal d'evitar el possible atac corrosiu de l' $\text{AlCl}_3$  a les parets del reactor.

#### 1. Dimensions dels reactors

El reactor es dissenya com un recipient cilíndric amb fons superior i inferior toriesfèrics, seguint els mateixos criteris que en els càlcul de tancs d'emmagatzematge i del primer reactor. La longitud del llit catalític serà de 4 m, amb un diàmetre de 1,7 m, segons el volum que ocupen les 7,86 tones d'AlCl<sub>3</sub>, sobredimensionat un 20%. Amb això, el volum del cos cilíndric o carcassa del reactor total haurà de ser tal que el llit catalític ocupi el 85%. Així, el volum total de la carcassa és de 9,10 m<sup>3</sup>. Pel que fa als fons toriesfèrics, es té, amb un diàmetre de 1,7 m, una alçada de 0,264 m i un volum de 2,16 m<sup>3</sup> per fons. Amb això, s'obté un volum de reactor de 13,4 m<sup>3</sup>. Aquest volum s'aproximarà a l'alça fins als 15 m<sup>3</sup>.

## 2. Pressió de disseny

La pressió d'operació és l'atmosfèrica, per tant es tindrà en compte la següent relació:

$$P_{op.} \leq 300 \text{ psi (21 bar)} \rightarrow P = P_{op.} + 30 \text{ psi (2,07 bar)} \quad \text{Equació X-51}$$

Així, s'obté una pressió de disseny de 3,08 bar (45 psi).

## 3. Esforç de disseny a la tensió

S'ha decidit que s'utilitzarà, com s'ha dit anteriorment, acer inoxidable AISI 316L. La temperatura d'operació és de 125 °C, així que la temperatura de disseny seran aproximadament 160 °C, tenint en compte que en alguns moments o en algunes zones la temperatura dins del reactor pot incrementar-se.

Amb aquestes dades, es pot fer recerca de l'esforç de disseny a la tensió (S) el valor del qual és aproximadament el 25% de l'esforç últim a la tensió del material en qüestió. El valor de l'esforç últim a la tensió de l'AISI 316L és de 70.000 psi, per tant el 25 % són 17.500 psi.

## 4. Factor de soldadura

S'ha de tenir en compte d'alguna manera que la soldadura pot presentar defectes de fabricació, per això s'ha de tenir definit el factor de soldadura, E, que redueix el valor del límit elàstic. Suposant radiografiat parcial, el valor del factor de soldadura és de E=0,85.

## 5. Espessor de corrosió

Tot i que els materials que puguin haver dins del reactor no suposin problemes per corrosió, s'ha de tenir en compte un gruix addicional pensat per resistir l'atac d'alguns fluids i sòlids a les parets i fons del recipient. Com no s'espera una forta corrosió de l'equip durant l'operació, s'escull un sobreesspessor de corrosió de 1 mm.

## 6. Factor de radis

El factor M és la relació entre els radis del fons toriesfèric: r és el radi dels artells del fons i R és el radi bombat major, que ha de ser igual al radi del cos cilíndric. En la major part d'equips amb fons toriesfèrics, s'emptra la relació  $R=10 \cdot r$ , de manera que el factor de radis queda fixat com  $M=1,54$ .

## 7. Espessors dels reactors

Segons les equacions X-18 i 19, es pot calcular l'espessor del cos cilíndric i dels fons toriesfèrics:

Per al cos cilíndric: 
$$t = \frac{45 \text{ psi} \cdot 78.74 \text{ in}}{17500 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 45 \text{ psi}} = 0.239 \text{ in} = 6.06 \text{ mm}$$

Per als fons toriesfèrics: 
$$t = \frac{45 \text{ psi} \cdot 78.74 \text{ in} \cdot 1.54}{2 \cdot 17500 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 45 \text{ psi}} = 0.184 \text{ in} = 4.66 \text{ mm}$$

Addicionant l'espessor de corrosió, els espessors de carcassa i fons és de 6.06 i 4.66 mm, respectivament, els quals s'aproximaran a 7 i 5 mm.

## 8. Bescanvi de calor

El segon reactor treballa a 125 °C, però per fer-ho a aquesta temperatura s'ha d'anar retirant calor de manera constant per tal de mantenir condicions isoterms. Per calcular el flux de calor intercanviat en el reactor pel sistema de refredament, cal saber el calor de reacció.

El calor de reacció es calcula sabent els calors de formació dels compostos que intervenen en la reacció, així com els calors específics a pressió constant i la diferència de temperatura entre la temperatura d'operació i la temperatura estàndard de formació. Es pot calcular aplicant l'expressió X-25

Per calcular el calor de formació de cadascun dels reactius i productes involucrats es fa servir l'Equació X-26. Cada calor de formació de productes i reactius es troba detallat a continuació, així com els calors específics a les temperatures necessàries de càlcul, i d'altres propietats.

**Taula X – 11b. Calors específics, entalpies de formació, vaporització i reacció de les substàncies en el segon reactor.**

| PARÀMETRE / SUBSTÀNCIA             | $\text{CCl}_2\text{F}_2$ | $\text{CClF}_3$ | $\text{CCl}_4$ |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------|----------------|
| Calor específic a 25 °C (J/molK)   | 72.47                    | 66.97           | 83.95          |
| Calor específic a 76.5 °C (J/molK) | -                        | -               | 88.36          |

|                                                   |         |         |         |
|---------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Calor específic a 125 °C (J/molK)                 | 81.38   | 76.74   | 91.87   |
| Calor específic mitjà (J/molK)                    | 76.93   | 71.86   | 88.06   |
| Entalpia estàndard de formació estàndard (kJ/mol) | -481.48 | -695.01 | -100.48 |
| Entalpia de vaporització (kJ/mol)                 | 20.09   | 15.60   | 29.96   |
| Entalpia de formació a 125 °C (kJ/mol)            | -473.79 | -687.82 | -61.812 |
| Entalpia de reacció a 125 °C (kJ/mol)             |         | -16.10  |         |

Amb tot això, es pot determinar el flux calorífic que necessita el reactor, segons la fórmula següent:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} = \Delta H_{Reacció} \cdot F \quad \text{Equació X-8}$$

On  $q$  (W) és el flux calorífic que s'ha de subministrar o extreure del reactor,  $U$  (W/m<sup>2</sup>·°C) és el coeficient global de transferència d'energia,  $A$  (m<sup>2</sup>) és l'àrea de bescanvi calorífic i  $\Delta T_{ml}$  (°C) és la diferència de temperatures mitjana logarítmica.  $F$  és el cabal molar que creua el reactor, és a dir, 22.740 mols/h. El flux calorífic és de -366.097 kJ/h ó -101.694 W.

El coeficient global de bescanvi de calor,  $U$ , per a bescanvi de calor entre gasos i aigua oscil·la en un rang d'entre 5 i 35 W/m<sup>2</sup>·K. Es prendrà un coeficient global mitjà de 20 W/m<sup>2</sup>·K per realitzar els càlculs posteriors.

La temperatura mitjana logarítmica es calcula amb l'Equació X-9.

Amb el flux calorífic  $q$ , la  $\Delta T_{ml}$  i el coeficient global de bescanvi  $U$ , hom pot calcular l'àrea necessari de bescanvi de calor, que permetrà trobar les dimensions del sistema de mitja canya per a la refrigeració.

$$A = \frac{101.694 \text{ W}}{20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 99,92 \text{ K}} = 51,02 \text{ m}^2$$

Per tal de calcular el cabal d'aigua de refrigeració, s'utilitza l'equació X-12.

$$m = \frac{366.097 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (30 - 20) \text{ K}} = 8.758,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Pel que fa al càlcul de la llargada, número de voltes, diàmetre, etc., de la mitja canya per on circularà aigua refrigerant, cal seguir el mateix procediment de càlcul que en el reactor R-201.



Per tal de no repetir en excés les equacions i el procediment, s'exposarà a mode de resum al final d'aquest apartat els valors obtinguts en el bescanvi de calor

#### Pes del reactor

Les equacions que s'han utilitzat per calcular el pes dels reactors són l'Equació X-15, X-16 i X-20. S'obtenen, per tant un pesos que són recollits en les següents taules resum.

Amb les dades i equacions que s'han anat aportant fins ara, es poden construir les següents taules de valors dels paràmetres esmentats, a mode de resum del disseny:

**Taula X – 12. Taules resum del disseny del reactor R-401 i R-402.**

| <b>DISSENY MECÀNIC</b>                | <b>Valor</b> |
|---------------------------------------|--------------|
| Material de fabricació                | AISI 316L    |
| Pressió d'operació, $P_{op}$ (bar)    | 1,01         |
| Pressió de disseny, $P$ (bar)         | 3,08         |
| Temperatura d'operació, $T_{op}$ (°C) | 125          |
| Temperatura de disseny, $T$ (°C)      | 160          |

| <b>DIMENSIONS</b>        | <b>Valor</b> |
|--------------------------|--------------|
| Diàmetre intern (m)      | 2            |
| Diàmetre extern (m)      | 2,01         |
| Alçada cilindre (m)      | 3            |
| Alçada fons (m)          | 0,176        |
| Alçada total reactor (m) | 3,35         |
| Volum ( $m^3$ )          | 23           |
| Espessor cilindre (mm)   | 8            |
| Espessor fons (mm)       | 6            |

| <b>PESOS</b>               | <b>Valor</b> |
|----------------------------|--------------|
| Pes cilindre (kg)          | 603,64       |
| Pes fons torisfèric (kg)   | 46,74        |
| Pes equip (taratge, kg)    | 697,12       |
| Pes equip en operació (kg) | 8.187,82     |

| REFRIGERACIÓ per MITJA CANYA                     | Valor     |
|--------------------------------------------------|-----------|
| Coefficient global bescanvi ( $W/m^2\text{°C}$ ) | 20        |
| Flux calorífic (kJ/h)                            | 366.097   |
| Àrea bescanvi ( $m^2$ )                          | 51,02     |
| Fluid refrigerant                                | Aigua     |
| Material de construcció                          | AISI 316L |
| Cabal de refrigerant (kg/h)                      | 8.758,3   |
| Número de voltes                                 | 56        |
| Diàmetre de la conducció (m)                     | 0,046     |

### 10.3. Disseny membrana i tanc de cloració de $SbCl_5$

#### 10.3.1. Membrana de Nanofiltració

Per tal de regenerar el catalitzador que actua en el primer reactor, s'ha precisat el disseny d'un sistema de nanofiltració amb l'objectiu de separar el  $SbCl_5$  del CFC-11, el CFC-12, el  $CCl_4$  i l'HCl. Segons la patent publicada "*Process for the recovery of antimony pentachloride from used catalyst solutions (4,005,176)*" el  $SbCl_5$  perd la seva activitat passant a  $SbCl_3$ , aquesta desactivació química suposa un 10-15% de la quantitat total de  $SbCl_5$  dins del reactor.

Els equips que formen part dels sistemes de nanofiltració normalment són molt similars als d'osmosi inversa encara que operen a pressions menys baixes, fet que suposa un estalvi d'energia.

S'utilitza un equip de nanofiltració per realitzar la separació del catalitzador ja que aquesta es basa en la mida de les partícules dels components. Tal com es pot veure a la taula següent, aquests difereixen bastant respecte el pentaclorur d'antimoni de manera que afavoreix la correcta separació:

**Taula X – 13. Pesos moleculars dels productes que creuen la membrana.**

| Component | PM (g/mol) |
|-----------|------------|
| HF        | 20         |
| CFC-12    | 120,9      |
| CFC-11    | 137,4      |
| $CCl_4$   | 153,8      |
| $SbCl_3$  | 230        |
| $SbCl_5$  | 299        |

El tipus de membrana emprada serà la TS40 de la companyia TriSep. Es tracta d'una membrana de nanofiltració a base de piperazina amb un pes molecular de tall entre 200 i 300 daltons. Les característiques d'aquesta membrana es recullen en la taula següent:

**Taula X – 14. Valors típics de cabal, àrea, etc., per a membranes del tipus TS40**

| <b>Valors típics membrana TS40</b> |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|
| Caracterització                    | 34 L/(m <sup>2</sup> ·h) / 7,5 atm |
| Àrea activa                        | 2,4 m <sup>2</sup>                 |
| Rendiments                         | 60-98 %                            |
| Cabal per membrana                 | 1,36 L/min                         |
| Diàmetre                           | 90 mm                              |
| Llargada                           | 1170 mm                            |

Aquest sistema de nanofiltració s'ha dissenyat tenint en compte que hi circularà un 30% del cabal líquid que surt del reactor per tal d'aconseguir una activitat constant del catalitzador dins del reactor i no perdre eficàcia en la conversió, ja que, com s'ha esmentat abans, un 10-15% de la massa total de SbCl<sub>5</sub> passa a SbCl<sub>3</sub>. El rendiment de la membrana que s'ha suposat ha sigut del 75% ja que queda comprès en l'interval esmentat a les especificacions de la membrana.

Sabent el cabal per membrana que pot suportar i el cabal líquid del reactor que s'ha d'enviar per tal de regenerar el catalitzador, s'ha determinat el número de membranes en paral·lel:

$$Q_{membrana} = 1.36 \text{ L/min} = 0,082 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{reactor\ 1} = 1,49 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,30 = 0,447 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n_{membranes} \cdot Q_{membrana} = Q_{reactor\ 1} \rightarrow n_{membranes} = \frac{Q_{reactor\ 1}}{Q_{membrana}} \text{ Equació X-52}$$

$$n_{membranes} = \frac{0,447 \text{ m}^3/\text{h}}{0,082 \text{ m}^3/\text{h}} = 6 \text{ membranes}$$

La pressió de treball serà la del corrent de sortida del reactor, és a dir, a 7 atmosferes.

Així doncs, com que els rendiments estan expressats en tan per cent màssic, la quantitat de catalitzador recuperat per enviar al tanc de regeneració s'ha calculat:

$$\begin{aligned}
 Q_{s\ liquid,\ reactor} &= Q_{e,\ membrana} = 0,447 \text{ m}^3/\text{h} \\
 &= 787,8 \text{ kg/h en un 22,54\% molar (38,76\% màssic) de SbCl}_5
 \end{aligned}$$

$$Q_{e \text{ SbCl}_5, \text{ membrana}} = 787,8 \text{ kg/h} \cdot 0,3876 = 305,4 \text{ kg SbCl}_5/\text{h}$$

$$Q_{\text{concentrat}} = Q_{e \text{ SbCl}_5, \text{ membrana}} \cdot 0,75 = 229,0 \text{ kg SbCl}_5/\text{h pur}$$

$$Q_{\text{permeat}} = Q_{e, \text{ membrana}} - Q_{\text{concentrat}} = 787,8 \text{ kg/h} - 229,0 \text{ kg/h} = 558,8 \text{ kg/h}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{SbCl}_5, \text{ permeat}} &= Q_{e \text{ SbCl}_5, \text{ membrana}} - Q_{\text{filtrat}} = 305,4 \text{ kg/h} - 229,0 \text{ kg/h} \\ &= 76,3 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

$$\%_{\text{SbCl}_5, \text{ permeat}} = \frac{Q_{\text{SbCl}_5, \text{ residu}}}{Q_{\text{residu}}} \cdot 100 = \frac{76,3 \text{ kg/h}}{558,8 \text{ kg/h}} \cdot 100 = 13,66 \% \text{ de SbCl}_5$$

A continuació es presenta una taula resum amb la composició i el cabal de cada un dels tres cabals que hi intervenen:

**Taula X – 15. Dades utilitzades en el disseny del serpentí dels tancs T-10X.**

| <b>Corrent</b> | <b>Cabal total (kg/h)</b> | <b>Cabal SbCl<sub>5</sub> (kg/h)</b> | <b>% màssic SbCl<sub>5</sub></b> |
|----------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Entrada        | 787,8                     | 305,4                                | 38,76 %                          |
| Permeat        | 558,8                     | 76,3                                 | 13,66 %                          |
| Concentrat     | 299,0                     | 229,0                                | 100%                             |

El cabal de concentrat serà seguidament enviat cap al tanc de regeneració per tal de recuperar la seva activitat i acabar el cicle reintroduint-lo al reactor.

L'empresa TriSep Corporation venedora de la membrana TS40 no ha facilitat preus sobre aquesta. Altres empreses fabricants de membranes amb propietats semblants, tot i que la majoria destinades a la depuració d'aigües tal com és l'empresa *Xi'an Xinchengtai Water Treatment Technology Co.*, apunten un preu aproximat de 5.000 € englobant les 6 membranes i el suport d'aquestes, és a dir, tot l'equip industrial.

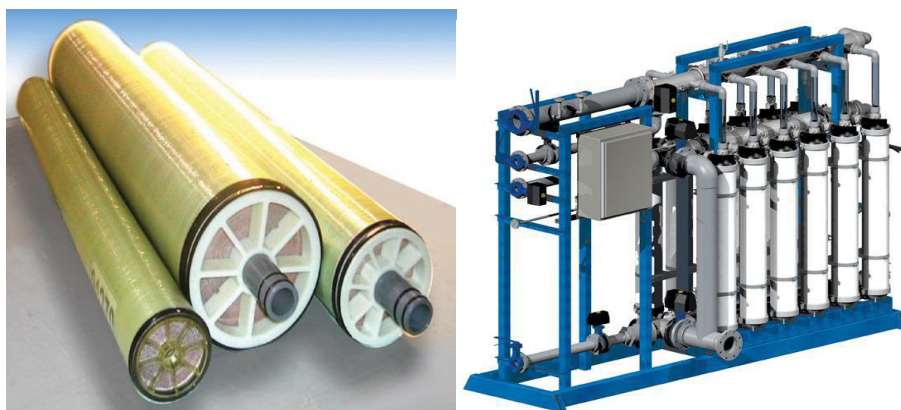


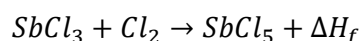
Figura X – 6. Membranes TS40 de l'empresa TriSep.

### 10.3.2. Tanc de cloració de $SbCl_5$

#### Introducció

Dins del sistema de regeneració en continu de  $SbCl_5$  s'ha d'introduir un tanc on clorar el catalitzador químicament desactivat. La desactivació té lloc quan es forma  $SbCl_3$  en el seguit d'intercanvis d'ions clor i fluor que té lloc en el primer reactor. Aquesta és una espècie inactiva la qual ha de reaccionar amb clor gas  $Cl_2$  per tornar a obtenir catalitzador. Com s'ha vist, aquesta desactivació és molt imprevisible i depèn molt de les condicions concretes del reactor en qüestió<sup>1</sup>. Es per aquest motiu que es dissenya un sistema de regeneració en continu a fi de dur a terme la regeneració desitjada quan sigui necessari.

A continuació es mostra la reacció que té lloc en aquest reactor:



La entalpia de formació  $\Delta H_f$  és de 13,8 cal/g de  $SbCl_3$ .

El sistema es dissenyarà per tractar uns  $0,2\text{m}^3/\text{h}$  ( $229\text{kg}/\text{h}$ ) de catalitzador un cop s'ha separat en el sistema de membranes. Segons la patent emprada per dissenyar aquest sistema, la desactivació assoleix un equilibri químic (variable segons les condicions d'operació) del 85%-15% de  $SbCl_5$  - $SbCl_3$ . Per relació equimolar cal introduir  $0,46\text{m}^3/\text{h}$  ( $10,6\text{ kg}/\text{h}$ ) de clor gas. Per temperatures entre  $20 - 100\text{ }^\circ\text{C}$  la reacció és molt favorable, i com es treballa a  $95^\circ\text{C}$  (temperatura del R-201) es considerarà una conversió del 100% amb un temps de residència d'1 hora, ja que la cinètica s'espera afavorida per la temperatura.

En aquestes circumstàncies, es tria dissenyar un tanc d' $1\text{ m}^3$  per contenir un 66% de líquid.

## 1. VOLUM

El tanc tindrà un volum total de  $1\text{ m}^3$  i serà toriesfèric ja que treballa a la mateixa pressió que el cabal de sortida de la nanofiltració, a 6,63 atm. Emprant les equacions per calcular les dimensions en el disseny del R-201 s'obtenen les següents dimensions:

**Taula X – 16. Dimensions calculades per al reactor de cloració R-202.**

| <b>Dimensions del reactor R-202</b>      |      |
|------------------------------------------|------|
| Alçada cilindre (m)                      | 1,36 |
| Alçada caps toriesfèrics (m)             | 0,31 |
| Alçada reactor (m)                       | 1,67 |
| Diàmetre intern (m)                      | 0,91 |
| Volum cilindre ( $\text{m}^3$ )          | 0,88 |
| Volum caps toriesfèrics ( $\text{m}^3$ ) | 0,12 |
| Volum reactor ( $\text{m}^3$ )           | 1,00 |

## 2. PRESSIÓ

La metodologia pel càlcul de la pressió de disseny serà la mateixa emprada en el cas del reactor R-201, és a dir, utilitzant les equacions X-4, X-23 i X-24.

$$\Delta P = 2162 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1,42 \text{ m} = 30086,39 \text{ Pa} = 0,30 \text{ bar}$$

$$P_{\text{disseny}} = (6,63 + 0,30) \cdot 1,15 = 7,97 \text{ bar}$$

$$P_{\text{disseny}} = 6,63 + 0,30 + 0,5 = 7,43 \text{ bar}$$

Finalment es determina una pressió d'operació de l'equip de 7,97 bar, a efectes pràctics 8 bar que corresponen a 116,03 psi.

## 3. ESPESSOR DEL REACTOR

El tanc de cloració serà del material AISI 316L teflonat (1mm) per tal d'evitar la corrosió d'aquest, tot i que no hi haurà quasi àcid. Els paràmetres característics d'aquest material es presenten a continuació, utilitzant les expressions X-18 i X-19.

$$\left. \begin{array}{l} S = 18675 \text{ psi} \\ E = 0,85 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Cos cilíndric: } t = \frac{116,03 \text{ psi} \cdot 17,86''}{18675 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 11,603} = 3,30 \text{ mm} \\ \text{Cap toriesfèric: } t = \frac{116,03 \text{ psi} \cdot 35,71'' \cdot 1,54}{2 \cdot 18675 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 11,603 \text{ psi}} = 5,10 \text{ mm} \end{array}$$

M=1,54

Així doncs, el gruix real de l'equip serà de 5,10 mm (el més desfavorable). No se li suma sobressessor per corrosió (C1) ja que estarà teflonat per evitar-la en cas que n'hi hagi. Així doncs, el diàmetre extern del reactor serà de 0,93 m.

#### 4. BESCANVI DE CALOR

Al tractarse d'un tanc petit, es refrigerarà mitjançant una camisa amb aigua de torre. Es suposarà que el sistema presenta la mateixa U d'intercanvi que el R-201, uns 300 W/m<sup>2</sup>K. Donat el cabal a tractar, es generarà una calor de 1981 kJ/h, que s'haurà de retirar tenint en compte que el Cl<sub>2</sub> s'introdueix a 25°C i s'opera a 95°C. Fent el balanç energètic amb l'Equació X-12:

$$q_{cl} = 10,6 \frac{kg}{h} \cdot 480 \frac{J}{kgK} \cdot (95 - 25)K = 356160 \frac{J}{h} = 356,16 \frac{kJ}{h}$$

$$q_a = q_g - q_{cl} = 1981 - 356,16 = 1624,84 \frac{kJ}{h}$$

$$m_a = \frac{q_a}{C_{pa} \Delta T} = \frac{1624,84 \frac{kJ}{h}}{4,18 \frac{kJ}{kgK} \cdot (40 - 30)K} = 38,87 \sim 39 \frac{kg}{h}$$

L'àrea de bescanvi necessària segons la U serà calculada amb l'expressió X-8:

$$A = \frac{1624,84 \frac{kJ}{h}}{300 W/m^2K \cdot (40 - 30)K} = 0,542 m^2$$

Seguidament es realitza el disseny de la camisa per tal de garantir les necessitats calorífiques del reactor calculant que l'àrea d'aquest ocupada pel líquid sigui superior a l'àrea de bescanvi necessària sense tenir en compte el fons toriesfèric obtenint una àrea total de 3,24 m<sup>2</sup> fet que indica que hi ha àrea de sobres per tal de garantir aquesta energia calorífica.

La camisa ocuparà el 75% de l'alçada del reactor sense tenir en compte el cap toriesfèric inferior ja que el líquid ocuparà un 66% del volum, de manera que tindrà una alçada de:

$$h_{camisa} = 0,75 \cdot alçada cilindre = 0,75 \cdot 1,36 = 1,02 m$$

Tenint en compte que el diàmetre serà aproximadament el mateix que el del reactor, és a dir 0,91 m, l'àrea d'escalfament del reactor serà:

$$A_{camisa} = D_{intern} \cdot h_{camisa} \quad \text{Equació X-5}$$

$$A_{camisa} = 0,91 \, m \cdot 1,02 \, m = 0,93 \, m^2 > 0,542 \, m^2$$

L'àrea encamisada és superior a la dictada per les necessitats d'escalfament.

## 5. AGITACIÓ

Pel que fa l'agitació, s'utilitzaran propellers (marine propeller, PR) que generaran un flux axial per garantir l'homogeneïtzació entre el clor gas i el catalitzador en estat líquid. La potència d'agitació per unitat de volum serà molt més elevada que en el cas del R-201 ja que interessa una agitació severa per garantir l'absorció gasosa i una correcta transferència tant de calor com de matèria (Figures 4 i 5). Aquesta potència correspon a 2 kW/m<sup>3</sup>, que multiplicat per el volum del tanc és una potència de 2 kW.

Les dimensions de l'agitador s'han calculat a partir d'elles referències extretes de la bibliografia "Euzen, J-P., Trambouze, P., "Chemical reactors: from design to operation" característiques d'un propeller marine:

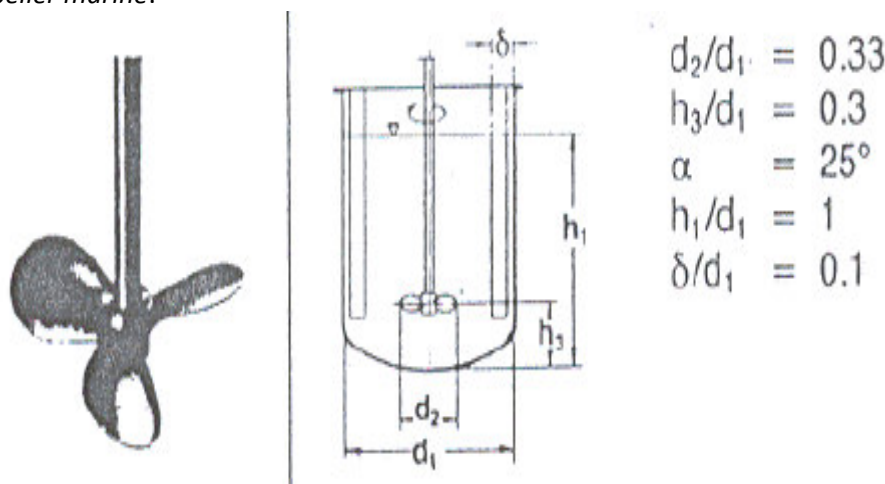


Figura X – 7. Dimensions obtingudes en la bibliografia per al segon agitador, AG-202.

Mitjançant aquestes relacions expressades a la figura els paràmetres característics es presenten a la taula següent:

Taula X – 17. Dimensions de l'agitador AG-202.

| Dimensions agitador (m) |    |      |
|-------------------------|----|------|
| Diàmetre intern         | d1 | 0,91 |
| Diàmetre agitador       | d2 | 0,30 |
| Distància fons          | h3 | 0,27 |



|                      |          |      |
|----------------------|----------|------|
| Alçada mínima líquid | d1       | 0,91 |
| Gruix baffles        | $\delta$ | 0,09 |
| Alçada agitador      | h        | 1,4  |

Per calcular la velocitat d'agitació d'aquest cal tenir en compte les equacions X-39 i 41, emprades pel càlcul de potència en el disseny del reactor R-201:

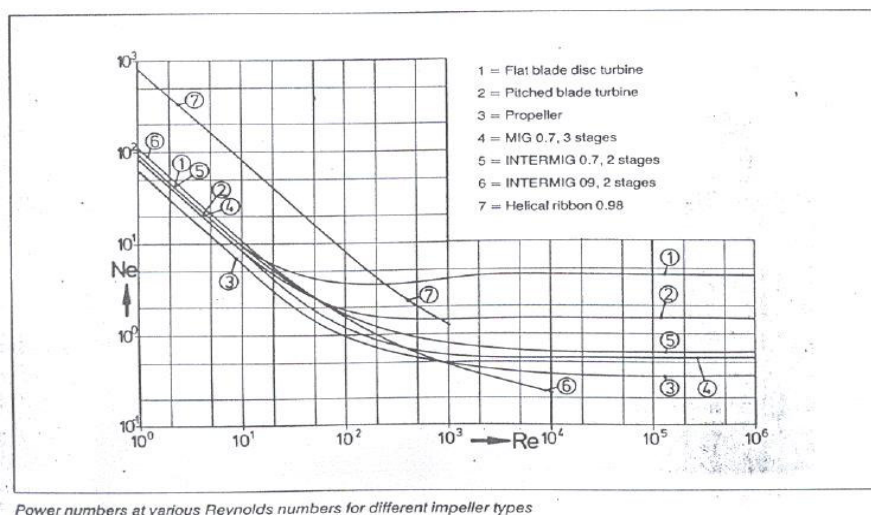
$$v_{fluid} = \frac{0,91 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 0,00025 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{0,91 \text{ m} \cdot 0,00025 \text{ m/s} \cdot 2162 \text{ kg/m}^3}{0,0008335 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 590$$

El valor tan petit del Reynolds indica clarament que es tracta d'un règim laminar a partir del qual es pot determinar la velocitat d'agitació:

$$v_{agitació} = N = \frac{590 \cdot 0,0008335 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{(0,91 \text{ m})^2 \cdot 2162 \text{ kg/m}^3} = 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

A partir de la gràfica que es presenta a continuació per seleccionar el número de potencia a partir del Reynolds i el tipus d'agitador, es determina un  $N_p = 0,85$  ja que l'agitador és del tipus 3 (propeller). A partir de la figura X-8 i de l'Equació X-42, es pot calcular N.



**Figura X – 8. Valor del nombre de potència per a diversos valors de Reynolds.**

$$N = \sqrt[3]{\frac{2000 \text{ W}}{(0,30 \text{ m})^5 \cdot 0,85 \cdot 2162 \text{ kg/m}^3}} = 21,16 \text{ s}^{-1} = 128,7 \text{ rpm}$$

De manera que l'agitació del tanc de cloració serà de 130 rpm a una potència de 2000 W.

## 6. PES DEL REACTOR

El taratge del reactor és el pes del reactor buit, calculat amb les expressions X-46, X-47 i X-48.

$$V_{AISI\ 316L, \text{ cilindre}} = \pi \cdot 0,93\ m \cdot 1,36\ m \cdot 0,0051\ m = 0,020\ m^3$$

$$V_{AISI\ 316L, \text{ cap torresfèric}} = 0,081 \cdot [(0,93\ m)^3 - (0,91\ m)^3] = 0,004\ m^3$$

$$Pes_{total} = (0,020\ m^3 + 2 \cdot 0,004\ m^3) \cdot 7960\ kg/m^3 = 1655,7\ kg$$

Sobredimensionant el pes del reactor amb un 10% ja que no s'ha comptabilitzat l'encamisat i l'agitador, s'obté un pes final de 1904,1 kg.

El pes operacional es calcula tenint en compte el volum del fluid que hi haurà dins del reactor en operació:

$$V_{fluid} = 0,66 \cdot V_{reactor} \cdot \rho_{liquid} = 0,66 \cdot 1\ m^3 \cdot 2162\ \frac{kg}{m^3} = 1426,9\ kg$$

$$Pes_{operacional} = V_{fluid} + Taratge = 1426,9\ kg + 1904,1\ kg = 3331\ kg$$

## 10.4. Columnes de destil·lació

Per l'elaboració de la planta de producció de CFC-13 s'han dissenyat quatre columnes de destil·lació. Per a aquest disseny s'ha hagut de fer primerament un disseny numèric, seguit del dimensionament de la columna i finalment el disseny mecànic d'aquesta.

### 10.4.1 Disseny numèric

El disseny numèric d'una columna multi component passa primerament pel mètode de càlcul estimatiu anomenat *shortcut*. Aquest ens proporciona número d'etapes mínimes, número d'etapes teòriques i reflux mínim d'operació utilitzant les equacions de Gililand, Fenske i Underwood.

#### Número de plats mínims

Per sistemes a volatilitat relativa constant,  $\alpha$ , Fenske demostrà l'equació per al número mínim d'etapes de reflux total en una columna de destil·lació. Per a una mescla multi component, l'equació de Fenske s'expressa en termes de les concentracions al destil·lat,  $D$ , i en les cues,  $W$ ,

dels components escollits com clau lleuger, *LK* i clau pesat, *HK*, i, a més, de la volatilitat relativa del component clau lleuger amb respecte a la del clau pesat. L'equació és:

$$N_m = \frac{\ln\left[\left(\frac{X_{D,LK}}{X_{D,HK}}\right)\left(\frac{X_{W,HK}}{X_{W,LK}}\right)\right]}{\ln\alpha_{LK/HK}} \quad \text{Equació X-54}$$

Escollint els components claus, especificant les seves concentracions o fraccions de recuperació en el destil·lat i elegint una pressió en els caps i les cues de les columnes per al càlcul de la volatilitat relativa del component clau lleuger respecte al clau pesat es pot calcular el número mínim d'etapes amb l'equació anterior. Un cop sabem això es poden calcular les concentracions o recuperacions per al altres components amb les seves respectives volatilitats respecte al clau pesat amb la mateixa equació.

#### Relació de Reflux mínim

Per a les mescles multi component amb volatilitat relativa contents, la relació de reflux mínim en una columna de destil·lació pot calcular-se mitjançant dos equacions demostrades per Underwood i corresponen a les següents fórmules:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i X_{i,F}}{\alpha_i - \theta} = 1 - q \quad \text{Equació X-55}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i X_{i,D}}{\alpha_i - \theta} = 1 + R_m \quad \text{Equació X-56}$$

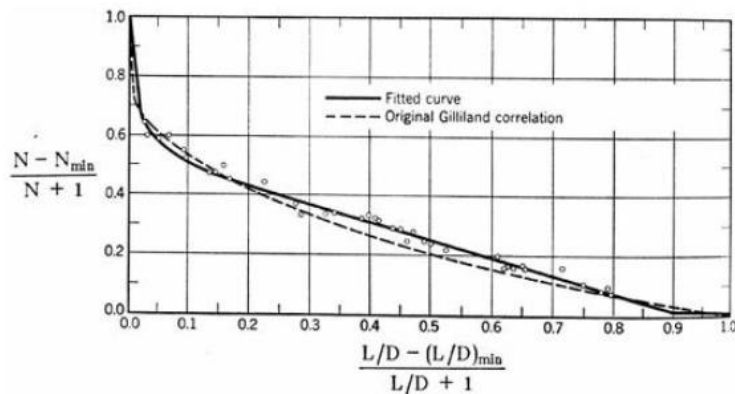
Sent *n*, el número de components en la mescla, *q*, la condició o qualitat de l'aliment i *R<sub>m</sub>*, la raó de reflux mínim.

La primera equació s'utilitza per calcular la variable  $\theta$  i es pren com solució el valor que es trobi entre les volatilitats relatives al component clau lleuger i el clau pesat. La segona equació d'Underwood utilitza aquest valor de  $\theta$ , calculat amb l'equació anterior per estimar la relació de reflux mínim. La solució exacta per a aquest procediment requereix d'un mètode iteratiu.

#### Número de plats reals

Gilliland demostrà empíricament la relació entre número de etapes *N* a un reflux finit per un número mínim d'etapes *N<sub>min</sub>* i la mínima relació de reflux (*L/D*)<sub>min</sub>.

S'utilitza la figura següent.



**Figura X – 8. Gràfic empíric de Gilliland que relaciona les etapes amb el reflux.**

Com s'ha calculat  $(L/D)_{\min}$  amb les equacions de Underwood es pot calcular l'eix d'abscisses. Un cop es té aquest valor es determina el valor de l'ordenada. Al tenir  $N_{\min}$  calculat per Fenske ja es pot trobar el valor d'etapes real  $N$ .

#### Relació de reflux d'operació

Hi ha una determinació de reflux òptim per una separació desitjada, perquè com major és aquesta, disminueix el número d'etapes requerides i per tant el cost de la columna, però s'augmenta el flux de la fase vapor a través de la columna, el que augmenta els costos de condensador, reboiler, aigua de refrigeració i vapor de calefactor. Experimentalment s'ha demostrat que la relació de reflux es troba en un interval entre  $1,03 < R < 1,3$ .

#### Determinació del plat de l'aliment

El plat òptim d'aliment pot ser també estimat. S'utilitza l'equació de Fenske per estimar on ha de ser el plat d'aliment a reflux total. Això es pot fer determinant el nombre d'etapes requerides de les concentracions de l'aliment fins les concentracions de l'aliment.

#### Determinació del mètode shortcut amb ASPEN HYSYS®.

Per no realitzar tots aquests càlculs e iteracions manualment, s'ha utilitzat una *shortcut column* amb ASPEN HYSYS® per tal de calcular etapes mínimes, reflux mínim, possibles etapes reals, possible plat d'aliment i cabal de destil·lat obtenint aquests valors.

Taula X – 18. Valors significatius obtinguts amb els *shortcuts* fets amb el simulador ASPEN HYSYS®.

| Paràmetres / Columna                | C-201   | C-202   | C-401 | C-402 |
|-------------------------------------|---------|---------|-------|-------|
| Pressió caps (atm)                  | 7       | 8       | 8     | 8     |
| Pressió cues (atm)                  | 7       | 8       | 8     | 8     |
| Mínim nombre d'etapes               | 10      | 9       | 12    | 5     |
| Número d'etapes reals               | 13 o 14 | 12 o 13 | 18    | 17    |
| Plat òptim de l'aliment             | 7 o 8   | 5 o 6   | 7     | 3 o 4 |
| Condensador (K)                     | 245     | 235     | 242,3 | 247,9 |
| Reboiler (K)                        | 382,6   | 306,4   | 388,7 | 438,4 |
| Reflux mínim (L/D)                  | 0,274   | 0,328   | 0,478 | 0,576 |
| Reflux operació (L/D) <sub>op</sub> | 1,223   | 1,987   | 1,712 | 1,324 |
| Cabal de destil·lat (kmols/h)       | 61,89   | 41,24   | 13,5  | 2,52  |

Els refluxos d'operació s'han agut d'augmentar després de multiplicar-los per la recomanació de  $1,5 \cdot (L/D)_{\min}$  per a obtenir un cabal intern de líquid considerable (Max Flooding %). Amb aquestes dades es pot procedir a fer el disseny rigorós de les columnes de destil·lació.

#### Mètode rigorós

El mètode rigorós per disseny de columnes és força complex alhora de resoldre'l numèricament. Aquest es basa en agrupar i resoldre totes les equacions etapa a etapa. D'aquesta manera es poden agrupar i resoldre tots els balanços de matèria per cada component de manera simultània i igualment per als balanços d'energia. D'aquesta manera s'escriuen les equacions de forma matricial.

El problema d'aquest mètode és que tenim un gran nombre d'equacions, a saber, balanç de matèria i energia global per a cada component, balanç de matèria i energia per a cada plat i cada component i finalment balanços de matèria i energia al condensador i al reboiler. Fent la suma d'equacions per a diversos components en diversos plats es pot esperar una matriu enorme només podent-la resoldre-la a través de mètode iteratiu o d'alguns programes informàtics de càlcul.

Per a poder realitzar aquest mètode i a partir dels valors del *shortcut*, es programen les columnes rigoroses amb el ASPEN HYSYS® tot variant algun paràmetre ja sigui nombre d'etapes o plat de l'aliment per a obtenir els resultats desitjats, perquè com ja s'ha comentat, el mètode *shortcut* és un mètode aproximat.

Taula X – 19. Valors obtinguts fent les columnes rigoroses.

| Paràmetres / Columna          | C-201 | C-202 | C-401 | C-402 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Número d'etapes reals         | 14    | 13    | 19    | 18    |
| Plat òptim de l'aliment       | 7     | 5     | 10    | 4     |
| Condensador (K)               | 245   | 235,2 | 242,3 | 306   |
| Reboiler (K)                  | 382,5 | 306,5 | 387,8 | 437,6 |
| Cabal de destil·lat (kmols/h) | 61,88 | 41,63 | 13,48 | 2,5   |

Les pressions d'operació i el reflux d'operació són els mateixos.

Com es pot apreciar, els valors del mètode *shortcut* amb els del mètode rigorós varien ben poc el que ajudat a un més fàcil disseny de les columnes.

#### Funció de les columnes

- **Columna C-201**

A la sortida del reactor s'obté  $\text{SbCl}_5$ ,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{HCl}$ , CFC-11 i CFC-12. Ens interessa obtenir per una part els productes  $\text{HCl}$  i CFC-12 i per l'altre els reactius i el catalitzador,  $\text{SbCl}_5$ ,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ . La separació d'aquesta columna és la següent.

Taula X – 20. Composició i cabal obtingut en la columna C-201.

| Columna                             | CD-201  |       |       |
|-------------------------------------|---------|-------|-------|
|                                     | Entrada | Caps  | Cues  |
| Cabal (Kmol/h)                      | 121,9   | 61,88 | 60,09 |
| <b>Fracció Molar</b>                |         |       |       |
| <b><math>\text{SbCl}_5^*</math></b> | 0,036   | 0,00  | 0,072 |
| <b>Refrig-11</b>                    | 0,335   | 0,00  | 0,680 |
| <b><math>\text{CCl}_4</math></b>    | 0,122   | 0,00  | 0,247 |
| <b>HF</b>                           | 0       | 0,00  | 0,00  |
| <b>HCl</b>                          | 0,338   | 0,376 | 0,00  |
| <b>Refrig-13</b>                    | 0       | 0,00  | 0,00  |

|                  |       |       |      |
|------------------|-------|-------|------|
| <b>Refrig-12</b> | 0,169 | 0,624 | 0,00 |
|------------------|-------|-------|------|

Es pot apreciar que s'han separat perfectament els productes dels reactius, que era el que interessava per continuar favorablement el procés.

- **Columna C-202**

Aquesta columna vol separar els caps de la columna anterior, CD-201, per portar a tractar l'àcid fluorhídric i cap al segon reactor el CFC-12 el més pur possible i lliure d'àcid.

**Taula X – 21. Composició i cabal obtingut en la columna C-202.**

| <b>Columna</b>           | <b>CD-202</b>  |             |             |
|--------------------------|----------------|-------------|-------------|
|                          | <b>Entrada</b> | <b>Caps</b> | <b>Cues</b> |
| <b>Cabal (Kmol/h)</b>    | 61,88          | 41,55       | 20,33       |
| <b>Fracció Molar</b>     |                |             |             |
| <b>SbCl<sub>5</sub>*</b> |                | 0,00        | 0,00        |
| <b>Refrig-11</b>         |                | 0,00        | 0,00        |
| <b>CCl<sub>4</sub></b>   |                | 0,00        | 0,00        |
| <b>HF</b>                |                | 0,00        | 0,00        |
| <b>HCl</b>               |                | 0,990       | 0,00        |
| <b>Refrig-13</b>         |                | 0,00        | 0,00        |
| <b>Refrig-12</b>         |                | 0,010       | 1,00        |

Els resultat obtinguts són prou satisfactoris ja que s'obté el Refrig-12 pur de tal manera que no la producció en el segon reactor de Refrig-13 serà del màxim rendiment possible.

A l'obtenir aquest corrent pur s'haurà d'assumir que el corrent d'HCl que s'obté tingui un 1% molar d'impureses. Com no es pot aconseguir una separació ideal, s'ha preferit tindre una concentració mínima de CFC-12 als caps a tractar que enviar-li àcid clorhídric al segon reactor que esdevindria resultats fatídics en contactar amb el catalitzador AlCl<sub>3</sub>.

- **Columna C-401**

La columna CD-401 rep el corrent de sortida del reactor R-401, és a dir, productes i reactius no convertits, CCl<sub>4</sub>, Refrig-12 i Refrig-13. Es vol obtenir el producte final CFC-13 amb la màxima puresa possible.

Taula X – 22. Composició i cabal obtingut en la columna C-401

| Columna                  | CD-401  |       |       |
|--------------------------|---------|-------|-------|
|                          | Entrada | Caps  | Cues  |
| Cabal (Kmol/h)           | 22,74   | 13,48 | 9,26  |
| <b>Fracció Molar</b>     |         |       |       |
| <b>SbCl<sub>5</sub>*</b> | 0,00    | 0,00  | 0,00  |
| <b>Refrig-11</b>         | 0,00    | 0,00  | 0,00  |
| <b>CCl<sub>4</sub></b>   | 0,298   | 0,00  | 0,728 |
| <b>HF</b>                | 0,00    | 0,00  | 0,00  |
| <b>HCl</b>               | 0,00    | 0,00  | 0,00  |
| <b>Refrig-13</b>         | 0,592   | 1,00  | 0,002 |
| <b>Refrig-12</b>         | 0,110   | 0,00  | 0,269 |

S'obté el producte final amb la puresa desitjada, és a dir, del 0,9999, tot i que això impliqui perdre un 0,002 molar per les cues, cosa no molt preocupant ja que aquest corrent anirà a una altra columna i posteriorment al segon reactor de nou.

- **Columna C-402**

El corrent de cues de l'anterior columna CD-401 passa directament a aquesta columna, la funció de la qual serà separar el CCl<sub>4</sub> per les cues i el refrigerant 12 i el 13 per els caps. Com tot són productes d'interès i els podem recircular al reactor on participin com a reactius, el corrent que contingui el CCl<sub>4</sub> anirà al primer reactor i l'altre cap al segon.

Taula X – 23. Composició i cabal obtingut en la columna C-402.

| Columna                  | CD-402  |      |       |
|--------------------------|---------|------|-------|
|                          | Entrada | Caps | Cues  |
| Cabal (Kmol/h)           | 9,26    | 2,5  | 6,76  |
| <b>Fracció Molar</b>     |         |      |       |
| <b>SbCl<sub>5</sub>*</b> | 0,00    | 0,00 | 0,00  |
| <b>Refrig-11</b>         | 0,00    | 0,00 | 0,00  |
| <b>CCl<sub>4</sub></b>   | 0,728   | 0,01 | 0,996 |



|                  |       |      |       |
|------------------|-------|------|-------|
| <b>HF</b>        | 0,00  | 0,00 | 0,00  |
| <b>HCl</b>       | 0,00  | 0,00 | 0,00  |
| <b>Refrig-13</b> | 0,002 | 0,01 | 0,00  |
| <b>Refrig-12</b> | 0,269 | 0,98 | 0,004 |

#### 10.4.2. Dimensionament de les columnes

Un cop elaborada la part numèrica de les columnes, s'ha de fer el seu dimensionament, és a dir, donar-li alçada, diàmetre, alçada entre plats, caiguda de pressió, nivell de líquid, etc.

Tots els dimensionaments de les columnes s'ha fet amb el simulador ASPEN HYSYS®. El simulador funciona suposant primer que la columna es de plats i calcula el diàmetre de la columna. Si aquest es molt petit, menor a 0,305 metres el programa t'implica una columna empacada.

En aquest projecte les columnes CD-201, CD-202, CD-401 i CD-402 són empacades. S'ha decidit així perquè quant a disseny ja que les torres empacades son preferibles quant a valors alts per la relació gas-líquid. A més, solen ser més barates quan es tenen problemes de corrosió, que els hi ha degut als freons i als àcids.

En el cas de les columnes empacades els rebliments poden ser de dos tipus diferents, a saber, estructurat i aleatori. Aquests empacats solen ser estructures buides per dintre, petites i de diferents formes amb gran superfície per unitat de volum, poden ser ceràmics, metàl·lics, de plàstic, d'acer, etc.

El mètode de resolució que segueixen les columnes empacades és el mètode d'altura equivalent per a un plat teòric (HETP).

$$HETP = \frac{HTU \ln\left(\frac{mG}{L}\right)}{\left(\frac{mG}{L-1}\right)} = \frac{\text{altura de la columna}}{N^o \text{ de plats teòrics}} \quad \text{Equació X-57}$$

On:

- m: pendent de la recta operatòria.
- G: Flux molar de gas per unitat de superfície.
- L: Flux molar de líquid per unitat de superfície.

D'aquesta manera ja tenim l'alçada de la columna. I amb l'àrea de transferència de gas i líquid es podria trobar un valor estimat del diàmetre.

**Taula X - 24. Valors obtinguts amb ASPEN HYSYS que utilitza la correlació SLEv73, Norton i Frank per a les columnes de procés.**

| Columna Nº                | CD-201                               | CD-202                           | CD-401                           | CD-401                              |
|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Columna Tipus             | Packed                               | Packed                           | Packed                           | Packed                              |
| Packing Type              | Jaeger TriPacks - Plastic 3&1_2_Inch | Jaeger TriPacks - Plastic 1_Inch | Jaeger TriPacks - Plastic 1_Inch | Pall Rings (Plastic, random) 1_inch |
| Flooding Correlation      | SLEv73                               | SLEv73                           | SLEv73                           | SLEv73                              |
| HETP Correlation          | Frank                                | Frank                            | Frank                            | Norton                              |
| Est. # Pieces of Packing  | 19274                                | 132828                           | 34322                            | 67112                               |
| Est. Mass of Packing [kg] | 591,3                                | 161,90                           | 41,83                            | 117,9                               |
| Estimated Cost \$         | 1944,5                               | 1237,9                           | 319,9                            | 898,9                               |
| <b>Column Geometry</b>    |                                      |                                  |                                  |                                     |
| Section Diameter [m]      | 1,372                                | 0,610                            | 0,305                            | 0,457                               |
| X-Sectional Area [m2]     | 1,478                                | 0,292                            | 7,30E-02                         | 0,164                               |
| Section Height [m]        | 7,696                                | 5,603                            | 5,791                            | 8,159                               |
| <b>Hydraulic Results</b>  |                                      |                                  |                                  |                                     |
| Max Flooding [%]          | 65,2                                 | 60,5                             | 63,4                             | 64,2                                |
| Section DeltaP [kPa]      | 2,400                                | 1,282                            | 1,117                            | 3,263                               |
| DP per Length [kPa/m]     | 0,312                                | 0,23                             | 0,19                             | 0,40                                |
| Flood Gas Vel. [m3/h-m2]  | 3067                                 | 1697                             | 1943                             | 1058                                |
| Flood Gas Vel. [m/s]      | 0,852                                | 0,471                            | 0,540                            | 0,294                               |

Comentat els resultats, s'ha escollit els rebliments de plàstic que millors resultats donava quan a alçada de la columna, diàmetre de la columna, quilograms de rebliment, caiguda de pressió i màxim nivell de líquid, que com ja s'ha comentat, també s'han hagut d'augmentar els refluxos d'operació de les columnes. S'ha de comprovar que l'elecció del empaquet sigui la correcta ja que segons la grandària dels diàmetres de la columna s'han de seleccionar d'una mida o d'un altre.

**Taula X – 25. Rangs de mesura d'empacament aleatori per diàmetre de la columna.**

| Diàmetre de columna   | Mesura de l'empacat     |
|-----------------------|-------------------------|
| <0,3m (1 ft)          | <25 mm                  |
| 0,3 a 0,9m (1 a 3 ft) | 25 a 38 mm (1 a 1,5 in) |
| >0,9 m                | 50 a 75 mm (2 a 3 in)   |

Finalment, caldrà pensar quin tipus de plàstic s'utilitzarà per tal de que aguanti les temperatures crítiques d'operació i a la vegada resisteixi a la corrosió dels diferents compostos corrosius que tenim en les torres d'operació. Aquesta tasca es farà en el següent apartat

### 10.4.3. Disseny mecànic

El disseny mecànic tracta de dissenyar la columna a nivell real, és a dir, dimensionar les parets amb el seu gruix, elecció del material de les parets i del rebliment, calcular el pes total que tindrà la columna buida i plena, i finalment, caracteritzar-la amb difusors de líquid, retenidors d'empacat, etc.

#### Gruixos de les parets

Primerament es calculen els gruixos de les parets de les columnes, s'ha decidit fer-la de forma cilíndrica amb els capçals superior e inferior toriesfèrics. Per a aquest càlcul s'ha fer servir el manual ASME per disseny d'equips a pressió.

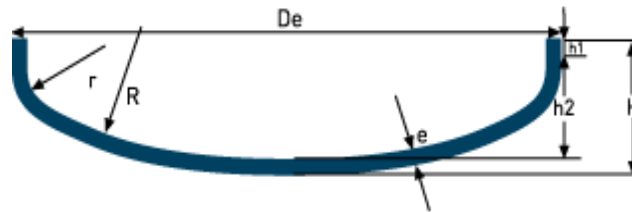
El material escollit per al disseny de la carcassa de les columnes serà **l'acer inoxidable 304L**. Cal esmentar que les columnes **CD-201 i CD-202** contenen àcid clorhídric i àcid fluorhídric i se'ls haurà d'aplicar una capa de **tefló** d'un gruix de 0,1 centímetres.

Per calcular l'espessor de les parets de columnes, s'utilitza l'Equació X-18.

Taula X – 26. Valors del gruix obtingut per la part cilíndrica de les columnes amb l'Equació X-18.

| Gruix de columna                         |             |              |              |              |
|------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Columna                                  | C-201       | C-202        | C-401        | C-402        |
| P (psi)                                  | 132,9       | 147,6        | 147,6        | 147,6        |
| Rint (m)                                 | 0,686       | 0,3048       | 0,1525       | 0,2286       |
| Rint (polzades)                          | 27          | 12           | 6            | 9            |
| S (psi)                                  | 15500       | 15700        | 15700        | 15700        |
| E eficiència                             | 0,85        | 0,85         | 0,85         | 0,85         |
| t (polzades)                             | 0,274       | 0,134        | 0,067        | 0,100        |
| Sobreesspessor de corrosió<br>(polzades) | 0,125       | 0,125        | 0,125        | 0,125        |
| Gruix total (polzades)                   | 0,399       | 0,259        | 0,192        | 0,225        |
| Gruix (cm)                               | 1,013       | 0,657        | 0,487        | 0,572        |
| Capa de tefló (cm)                       | 0,1         | 0,1          | -            | -            |
| Gruix final (cm)                         | <b>1,11</b> | <b>0,757</b> | <b>0,487</b> | <b>0,572</b> |

S'ha de tenir en compte que les columnes de destil·lació tenen capçals toriesfèrics, del qual s'haurà de calcular un nou gruix.



**Figura X – 9. Esquema d'un capçal toriesfèric amb les seves dimensions.**

El càlcul del gruix de la carcassa pels capçals torisfèrics s'ha fet també amb el manual ASME amb la següent correlació:

$$t = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} \quad \text{Equació X-58}$$

On:

- t: gruix (polzades)
- P: pressió interna del recipient més el seu sobredimensionament (psi).
- L: longitud especificada en la figura X.27.
- S: màxim valor de tensió permès per acer inoxidable 304L amb valors tabulats (psi).
- E: factor de soldadura amb valors tabulats.

**Taula X - 27. Valors de l'espessor obtinguts per als capçals toriesfèrics.**

| <b>Gruix de capçals</b>         |               |               |               |               |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Variable/Columna</b>         | <b>CD-201</b> | <b>CD-202</b> | <b>CD-401</b> | <b>CD-402</b> |
| <b>Dint (m)</b>                 | 1,372         | 0,6096        | 0,305         | 0,4572        |
| <b>Dint (polzades)</b>          | 54            | 24            | 12            | 18            |
| <b>L (0,95*Dint) (polzades)</b> | 51            | 23            | 11            | 17            |
| <b>r (0,1*L)</b>                | 5,1           | 2,3           | 1,1           | 1,7           |
| <b>(L/r)</b>                    | 10            | 10            | 10            | 10            |
| <b>P (psi)</b>                  | 132,9         | 147,6         | 147,6         | 147,6         |
| <b>S (psi)</b>                  | 15500         | 15700         | 15700         | 15700         |
| <b>E eficiència</b>             | 0,85          | 0,85          | 0,85          | 0,85          |
| <b>t (polzades)</b>             | 0,459         | 0,223         | 0,112         | 0,168         |

|                                              |              |              |              |              |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Sobreesspessor de corrosió (polzades)</b> | 0,125        | 0,125        | 0,125        | 0,125        |
| <b>Gruix total (polzades)</b>                | 0,584        | 0,348        | 0,237        | 0,293        |
| <b>Gruix (cm)</b>                            | 1,482        | 0,885        | 0,601        | 0,743        |
| <b>Capa de tefló (cm)</b>                    | 0,1          | 0,1          |              |              |
| <b>Gruix final (cm)</b>                      | <b>1,582</b> | <b>0,985</b> | <b>0,601</b> | <b>0,743</b> |

Per motiu de simplificar els dissenys dels equips, s'utilitzarà el **gruix més gran** en cada cas per no fer un aparell amb dos gruixos diferents. Per el que s'agafaran **els gruixos del disseny dels capçals toriesfèrics** ja que surten més gran en tots els casos.

#### Material utilitzats pels rebliments

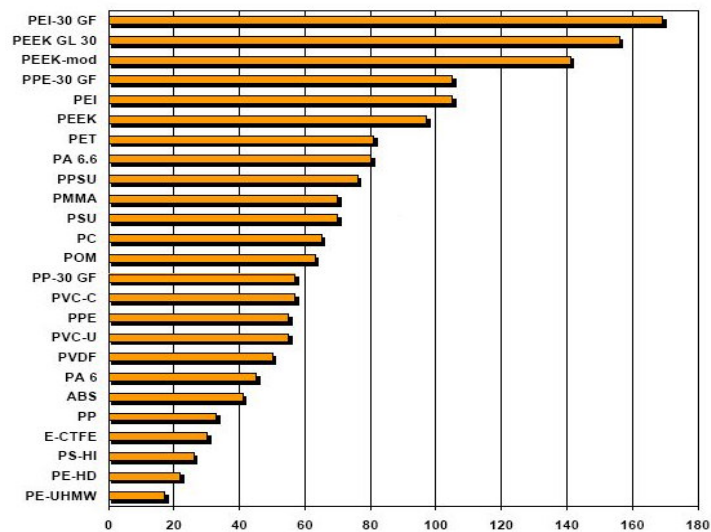
Els rebliments per les columnes de destil·lació **CD-201**, **CD-202** i **CD-401** seran de **polietilè d'alta densitat**. Aquesta elecció es deguda a que el polietilè suporta les temperatures d'operació que tenim en les 3 primeres columnes, de -33°C a 115°C, és a dir, aquestes temperatures queden dintre dels seus rangs de la seva temperatura de transició vítria i la temperatura de fusió. El rebliment del columna **CD-402** serà el **polipropilè** ja que tenim una temperatura de 164,6°C (veure Taula X-28).

En quant a pressió, tots els plàstics suporten les 7 o 8 atmosferes que utilitzen les columnes en operació (veure Taula X-29).

**Taula X – 28. Resistència a la temperatura de diferents plàstics.**

| Material                           | Temperatura de transició vítria (°C) | Temperatura de fusió (°C) |
|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| <b>Polietilè de baixa densitat</b> | -110                                 | 115                       |
| <b>Polietilè d'alta densitat</b>   | -90                                  | 137                       |
| <b>Clorur de Polivinil</b>         | 105                                  | 212                       |
| <b>Politetrafluoroetilè</b>        | -90                                  | 327                       |
| <b>Polipropilè</b>                 | -20                                  | 175                       |
| <b>Poliestirè</b>                  | 100                                  | -                         |
| <b>Niló 66</b>                     | 57                                   | 265                       |
| <b>Poliéster (PET)</b>             | 73                                   | 265                       |
| <b>Policarbonat</b>                | 150                                  | -                         |

Taula X – 29. Resistència a la pressió (MPa) de diferents plàstics.



### Equipatge intern de la columna

Tota columna de rebliment té un equipatge especial dintre de seu. Primerament, s'haurà de deixar un espai per l'entrada de l'aliment. En aquest espai separem el rebliment per la part de rectificació i esgotament. Per la part de dalt d'aquest espai i abans del rebliment es necessita un col·lector de líquid el qual ha de poder d'interrompre el flux de líquid sense bloquejar el flux de gas. La seva funció principal és aconseguir el mesclat efectiu del líquid abans de retirar-lo o redistribuir-lo. Per la part de baix de l'aliment, haurà de portar un distribuïdor de líquid, que s'encarrega de la distribució uniforme del líquid, disminueix la caiguda de pressió i té capacitat per mesclar el líquid que es vol distribuir per la columna.

Els dos empacats de cada columna, hauran d'estar subjectats per la seva part inferior. Això s'aconsegueix amb retenidors d'empacament, els quals prevenen la expansió o fluïdització del llit empacat, així com el mantenen horitzontal en la seva superfície. Les seves àrees lliures han de ser molt elevades. Al ser d'empacat aleatori hauran de portar també un subjectador d'empacat a la part superior ja que les peces poden ser arrastrades per segons quins cabals gasosos.

Finalment, un *demister* o captador de gotes, una malla metàl·lica recoberta de tefló en les columnes que calgui, en la qual les partícules líquides s'ajunten i es queden atrapades per després caure per gravetat cap al col·lector de líquid.

### Càlcul de l'aïllament tèrmic

Per l'elecció de l'aïllant s'han hagut de tindre en compte les temperatures de condensador i reboiler de les columnes ja que aquestes seran les temperatures més crítiques d'aquestes.

**Taula X – 30. Temperatures de condensador i reboiler de les columnes.**

| Paràmetres / Columna    | C-201  | C-202  | C-401  | C-402 |
|-------------------------|--------|--------|--------|-------|
| <b>Condensador (°C)</b> | -28,13 | -37,91 | -30,89 | 32,75 |
| <b>Reboiler (°C)</b>    | 109,4  | 33,31  | 114,6  | 164,5 |

A partir d'aquesta taula veiem que les temperatures crítiques de les columnes són, en el cas de les tres primeres columnes, els condensadors, amb temperatures molt baixes del rang de -30°C, i, per l'última columna, la temperatura del reboiler de 164,5°C.

Els aïllants típics més utilitzats es poden apreciar en la taula següent amb els seus rangs de temperatura òptims.

**Taula X – 31. Aïllants amb els seus rangs de temperatura òptima.**

| Material                      | Temperatura mínima (°C) | Temperatura màxima (°C) |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Llana mineral</b>          | 25                      | 750                     |
| <b>Llana de vidre</b>         | -                       | 500                     |
| <b>Escumes elastomèriques</b> | -50                     | 175                     |
| <b>Escumes de polietilè</b>   | 10                      | 90                      |
| <b>Escumes de poliuretà</b>   | -150                    | 100                     |
| <b>Poliestirè expandit</b>    | -                       | 70                      |

Veient aquestes dades, s'han escollit els següents materials per cada columna per a que els seus rangs de temperatura estiguin dins dels valors típics de l'aïllant seleccionat.

**Taula X – 32. Aïllants escollits per a cada columna.**

| Columna      | Material               |
|--------------|------------------------|
| <b>C-201</b> | Escumes elastomèriques |
| <b>C-202</b> | Escumes de poliuretà   |
| <b>C-401</b> | Escumes elastomèriques |
| <b>C-402</b> | Llana mineral de roca  |

Un cop s'ha fet el triatge dels aïllants s'ha de calcular l'espessor d'aquest. Per calcular el gruix de les escumes s'ha utilitzat l'equació

$$e = \frac{D_i}{2} \cdot \left[ \exp \left( \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \cdot \ln D_i + \frac{2 \cdot e_{ref}}{D_i} \right) \right] - \frac{D_i}{2}$$

Equació X-59

On:

- e: espessor mínim de l'aïllament (mm)
- $D_i$ : diàmetre intern de la columna (mm)
- $\lambda$ : conductivitat tèrmica d'escumes de poliuretà o d'escumes elastomèriques
- $\lambda_{ref}$ : conductivitat tèrmica de referència.  $\lambda_{ref}=0,040\text{W/mK}$
- $e_{ref}$ : espessor mínim de referència entre 60 i 70 (mm)

Taula X – 33. Valors dels espessors dels aïllants.

| Variable / Columna                                       | C-201                  | C-202             | C-401                  |
|----------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| <b>Material</b>                                          | Escumes elastomèriques | Escumes poliuretà | Escumes elastomèriques |
| <b><math>D_i</math> (m)</b>                              | 1,372                  | 0,61              | 0,305                  |
| <b><math>\lambda</math> (W/m·K)</b>                      | 0,035                  | 0,029             | 0,035                  |
| <b><math>\lambda_{ref}</math> (W/m·K)</b>                | 0,04                   | 0,04              | 0,04                   |
| <b><math>e_{ref}</math> (mm)</b>                         | 60                     | 70                | 60                     |
| <b><math>e_{min}</math> (m)</b>                          | 0,052                  | 0,049             | 0,052                  |
| <b><math>e</math> (m) <math>1,3 \cdot e_{min}</math></b> | 0,0676                 | 0,0637            | 0,0676                 |

Per al càlcul de l'aïllant de la columna C-402 de llana mineral de roca de  $80 \text{ Kg/m}^3$  amb el programa de càlcul INSULANCE de CALORCOL®. S'han especificat el recobriment exterior de laïllant, que serà d'a la temperatura interior de la columna, la temperatura desitjada a l'exterior de la columna i el material de la columna.

Taula X – 34. Valors obtinguts de l'espessor de llana de roca.

| Columna                                           | C-402           |
|---------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Temperatura més alta (°C)</b>                  | 164,6           |
| <b>Temperatura superfície de l'aïllament (°C)</b> | 40              |
| <b>Temperatura exterior (°C)</b>                  | 25              |
| <b>Velocitat de l'aire (km/h)</b>                 | 10              |
| <b>Material recobriment</b>                       | Acer inoxidable |
| <b>Espesor per l'aïllament (inch)</b>             | 2,5             |



|                                                    |               |
|----------------------------------------------------|---------------|
| <b>Espesor per l'aïllament (cm)</b>                | <b>6,25</b>   |
| <b>Espesor mínim aïllament (m)</b>                 | <b>0,0625</b> |
| <b>Espesor (m) <math>1,3 \cdot e_{\min}</math></b> | <b>0,0812</b> |

### Càlcul del pes de la columna

- **Càlcul del pes de la columna buida, amb rebliment i amb aïllant**

Primerament s'ha de sobredimensionar els valors d'alçades obtinguts amb el mètode *Tray Sizing* d'ASPEN HYSYS®. Aquest sobredimensionament es degut a que dintre de la columna hi ha tot l'equipatge comentat a l'apartat anterior i l'espai del plat de l'aliment.

Primerament, per al càlcul de l'espai per l'entrada de l'aliment, es mira a la taula de del dimensionament el coeficient HETP (m) que és la distància per cada etapa d'equilibri i la sobredimensionem un 10% per poder introduir el captador i distribuïdor de líquid.

Tot seguit es suma aquest valor a l'alçada que ja es tenia amb el mètode *Tray Sizing*. Un cop es té aquest valor, es fa el 20% d'aquesta alçada per deixar espai per l'equipament intern de la columna. Es deixarà un 10% a la part superior per el captador de gotes i el subjectador d'empacat. A la part inferior es deixarà un altre 10% per tal de posar l'altre retenidor d'empacat i possible acumulació de líquid, el que no preocupa massa ja que per això també estaran els seus respectius revoilers. I finalment, se li sumaran les alçades dels capçals toriesfèrics calculades amb les següents equacions obtingudes pel manual de càlcul *SLAWINSKI*®

$$h_{\text{toriesfèric}} = h_1 + h_2 = (3,5 \cdot s) + (0,1935da - 0,455s) \quad \text{Equació X-60}$$

On:

- h: alçada (m)
- S: gruix (m)
- da: diàmetre extern (diàmetre intern + 2·Ax) (m)

Un cop es tenen les alçades de les columnes, es procedeix a calcular els volums d'aquestes. Aquest càlcul es realitza calculant en primer lloc el volum intern i extern de la part cilíndrica. Restant el volum extern amb l'intern s'obté el volum de la carcassa cilíndrica. Es calcula d'igual manera per la part toriesfèrica. Els volums de la part toriesfèrica es calculen segons les equacions cercades al *Wankat*

Finalment, un cop es tenen els volums de les carcasses, es poden calcular els pesos de les columnes amb la densitat de l'acer inoxidable 304L. Per calcular de la columna amb el reblliment simplement s'haurà de sumar-li el pes del reblliment calculat anteriorment en l'apartat del dimensionament de les columnes. I, finalment se li sumarà el pes de l'aïllant que es fa seguint el mateix mètode.

El mètode de càlcul seguit és el seguit d'equacions següents.

$$V_{int,cilindre} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int}^2 \cdot h_{cilindre} \quad \text{Equació X-61}$$

$$V_{ext,cilindre} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{ext}^2 \cdot h_{cilindre} \quad \text{Equació X-62}$$

$$V_{carcassa cilíndrica} = V_{ext,cilindre} - V_{int,cilindre} \quad \text{Equació X-63}$$

$$V_{int,toriesfèric} = 0,513 \cdot h_{toriesfèric} \cdot D_{int}^2 \quad \text{Equació X-64}$$

$$V_{ext,toriesfèric} = 0,513 \cdot h_{toriesfèric} \cdot D_{ext}^2 \quad \text{Equació X-65}$$

$$V_{carcassa toriesfèrica} = V_{ext,toriesfèric} - V_{int,toriesfèric} \quad \text{Equació X-66}$$

$$V_{carcassa total} = V_{carcassa cilíndrica} + V_{carcassa toriesfèrica} \quad \text{Equació X-67}$$

$$Pes_{columna buida} = V_{carcassa total} \cdot \rho_{acer 304-L} \quad \text{Equació X-68}$$

**Taula X-35. Valors obtinguts per als càlculs dels pesos de les columnes buides. En negreta els valors d'alçada final de la columna, el volum intern, pes de la columna buida, amb reblliment i amb aïllant.**

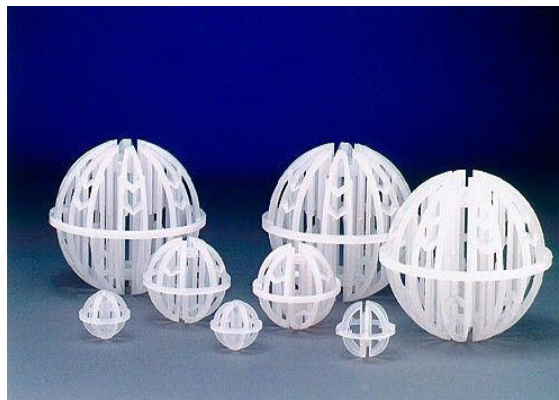
| Columna                                  | C-201       | C-202      | C-401      | C-402       |
|------------------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| <b>Alçada cilíndrica (m)</b>             | 7,70        | 5,60       | 5,79       | 8,16        |
| <b>HETP (m)</b>                          | 0,550       | 0,431      | 0,305      | 0,453       |
| <b>Espai per l'aliment 1,1·HETP</b>      | 0,605       | 0,474      | 0,335      | 0,499       |
| <b>Alçada més plat d'aliment (m)</b>     | 8,301       | 6,077      | 6,127      | 8,658       |
| <b>Sobredimensionament (1,2·Alçada)</b>  | 9,961       | 7,293      | 7,352      | 10,390      |
| <b>Gruix (cm)</b>                        | 1,582       | 0,985      | 0,601      | 0,743       |
| <b>Gruix (m)</b>                         | 0,0158      | 0,00985    | 0,00601    | 0,00743     |
| <b>Diàmetre intern (m)</b>               | 1,372       | 0,610      | 0,305      | 0,457       |
| <b>Diàmetre extern (m)</b>               | 1,403       | 0,629      | 0,317      | 0,472       |
| <b>Alçada dels capçals</b>               | 0,320       | 0,152      | 0,080      | 0,114       |
| <b>Alçada final (m)</b>                  | <b>10,3</b> | <b>7,4</b> | <b>7,4</b> | <b>10,5</b> |
| <b>Volum intern part cilíndrica (m3)</b> | 14,72       | 2,128      | 0,536      | 1,706       |
| <b>Volum extern part cilíndrica (m3)</b> | 15,40       | 2,27       | 0,58       | 1,82        |

|                                                   |               |               |               |               |
|---------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Volum de carcassa part cilíndrica (m3)</b>     | 0,69          | 0,14          | 0,04          | 0,11          |
| <b>Volum intern part torisfèrica (m3)</b>         | 0,309         | 0,0289        | 0,00379       | 0,0122        |
| <b>Volum intern total (m3)</b>                    | <b>15,03</b>  | <b>2,157</b>  | <b>0,540</b>  | <b>1,718</b>  |
| <b>Volum extern part torisfèrica (m3)</b>         | 0,323         | 0,0308        | 0,0041        | 0,0130        |
| <b>Volum extern total (m3)</b>                    | 15,728        | 2,299         | 0,584         | 1,831         |
| <b>Volum de la carcassa part torisfèrica (m3)</b> | 0,014         | 0,0019        | 0,00031       | 0,00081       |
| <b>Volum total de la carcassa (m3)</b>            | <b>0,7014</b> | <b>0,1417</b> | <b>0,0435</b> | <b>0,1135</b> |
| <b>Densitat acer inoxidable (kg/m3)</b>           | 7900          | 7900          | 7900          | 7900          |
| <b>Pes columna buida (Kg)</b>                     | <b>5541</b>   | <b>1119</b>   | <b>343</b>    | <b>897</b>    |
| <b>Pesos dels rebliments (Kg)</b>                 | 591,309       | 161,898       | 41,833        | 117,882       |
| <b>Pes de la columna amb rebliment (kg)</b>       | <b>6132</b>   | <b>1281</b>   | <b>385</b>    | <b>1015</b>   |
| <b>Espesor mínim per aïllament (m)</b>            | 0,052         | 0,049         | 0,052         | 0,0625        |
| <b>Espesor 1,3·emin (m)</b>                       | 0,0676        | 0,0637        | 0,0676        | 0,0813        |
| <b>Diàmetre extern més aïllament (m)</b>          | 1,51          | 0,727         | 0,421         | 0,597         |
| <b>Volum columna i aïllament (m3)</b>             | <b>18</b>     | <b>3,03</b>   | <b>1,023</b>  | <b>2,91</b>   |
| <b>Volum de aïllament (m3)</b>                    | 2,05          | 0,731         | 0,439         | 1,08          |
| <b>Densitat aïllant (Kg/m3)</b>                   | 60            | 38            | 60            | 80            |
| <b>Pes del aïllament (kg)</b>                     | 122,7         | 27,8          | 26,3          | 86,2          |
| <b>Pes de la columna amb aïllant (Kg)</b>         | <b>6255</b>   | <b>1309</b>   | <b>412</b>    | <b>1101</b>   |

- **Pes de les columnes en operació.**

Per al càlcul del pes de columna en operació s'ha de calcular en primer lloc restant-li el volum útil del rebliment al volum intern de la columna. El volum útil del rebliment vol dir que les peces de rebliment poden estar buides per dintre o parcialment buides, per tant, el volum útil serà el volum total d'aquesta peça menys el volum d'espai buit. Amb això s'obté el volum disponible per la circulació del líquid i del gas dintre de la columna, amb el qual multiplicant-lo per la densitat de la mescla que hi hagi en aquest volum per el temps de residència de la columna sabrem quants quilograms té en operació la columna. Aquest pes més el de la carcassa més el del rebliment ens donarà el pes total de la columna en operació.

Els empacats que s'han utilitzat són *Jaeger TriPacks* i *Pall Rings* els quals es poden apreciar en les següents figures.



**Figura X-10. Jaeger Tripacks de diferents mides de diàmetre. Al ser de forma esfèrica podrem calcular el volum de la peça amb els diàmetres que s'han escollit a partir del diàmetre de la columna.**



**Figura X-11. . Pall Rings de diferent grandàries de diàmetres. Es pot apreciar que són de forma cilíndrica el que facilita també el càlcul del volum amb el seu diàmetre i la seva alçada que són d'un rati de 1:1.**

Per començar calcularem el volum de les peces *Jaeger Tripacks*, seguit del seu volum útil, ja que com es pot apreciar en les figures anteriors, no són peces totalment plenes, i ,a continuació el volum total que ocupen totes les peces amb el nombre de peces totals. Un cop es té aquest volum se li resta al volum total de la columna i a aquest volum se li aplica un 60% perquè el pes total de la columna plena es calcula en funció de la densitat del corrent líquid d'entrada. Finalment i una vegada es té aquest pes, se li haurà de sumar el pes de la carcassa i el pes del rebliment per saber el pes total d'operació.

**Taula X-36. Càlcul del pes de les columnes en operació. S'ha hagut de cercar el tant per cent buit dels dos tipus de rebliment escollit.**

| Columna            | C-201         | CD-202        | C-401         | C-402             |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| Tipus de rebliment | <i>Jaeger</i> | <i>Jaeger</i> | <i>Jaeger</i> | <i>Pall Rings</i> |

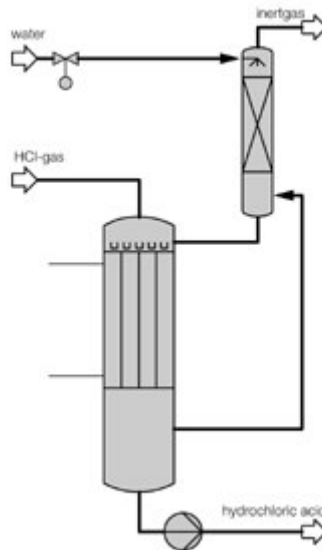
|                                                        | <i>Tripacks</i> | <i>Tripacks</i> | <i>Tripacks</i> |             |
|--------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| <b>Diàmetre rebliment (inch)</b>                       | 3,5             | 1               | 1               | 1           |
| <b>Diàmetre rebliment (m)</b>                          | 0,0889          | 0,0254          | 0,0254          | 0,0254      |
| <b>% peça buida</b>                                    | 95              | 90              | 90              | 91          |
| <b>Volum total peça (m3)</b>                           | 3,68E-04        | 8,58E-06        | 8,580E-06       | 1,29E-05    |
| <b>Volum útil peça (m3)</b>                            | 1,84E-05        | 8,58E-07        | 8,580E-07       | 1,16E-06    |
| <b>Número de peces #</b>                               | 19274           | 132828          | 34322           | 67112       |
| <b>Volum total peces (m3)</b>                          | 0,35            | 0,11            | 0,03            | 0,08        |
| <b>Volum intern de la columna (m3)</b>                 | 15,026          | 2,157           | 0,540           | 1,718       |
| <b>Volum útil de columna (m3)</b>                      | 14,67           | 2,04            | 0,51            | 1,64        |
| <b>Volum de líquid a la columna<br/>0,6-Vútil (m3)</b> | 8,803           | 1,226           | 0,306           | 0,984       |
| <b>Densitat corrent (Kg/m3)</b>                        | 1522            | 1297            | 1457            | 1326        |
| <b>Pes de fluid de pas (kg)</b>                        | 13402           | 1591            | 447             | 1305        |
| <b>Pes de la carcassa (kg)</b>                         | 5541            | 1119            | 343             | 897         |
| <b>Pes del rebliment (Kg)</b>                          | 591             | 162             | 42              | 118         |
| <b>Pes del aïllant (Kg)</b>                            | 122,7           | 27,8            | 26,3            | 86,2        |
| <b>Pes en operació (Kg)</b>                            | <b>19657</b>    | <b>2900</b>     | <b>858</b>      | <b>2406</b> |

## 10.4. Disseny de l'absorbidor

A continuació es presenta el manual de càlcul pel disseny de l'absorbidor d'àcid clorhídric, l'equip principal de l'àrea 300. L'objectiu d'aquest és el de convertir el corrent gasós de clorur d'hidrogen a la sortida de la columna C-202 en una dissolució al 32% d'àcid clorhídric en aigua. La principal problemàtica que presenta l'operació és l'elevat calor de dissolució que té el HCl gas en l'aigua (0,58 kWh/kg HCl). A més, operant de forma adiabàtica només es poden arribar a tenir concentracions del 30% màxim, amb la qual cosa haurem d'operar de forma isoterma retirant el calor generat sense que la temperatura de l'absorbidor canvi de forma notòria.

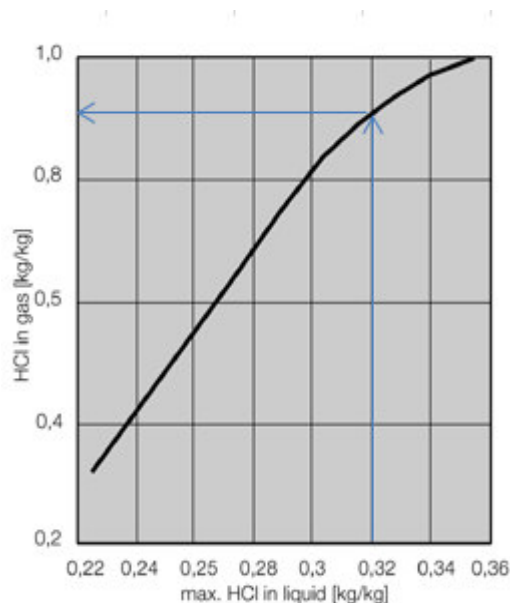
Per aquest motiu es dissenyarà un absorbidor de paret humida (en anglès *falling film absorber*), el qual no és més que un bescanviador de calor als tubs del qual té lloc l'absorció, mentre que la carcassa s'empra per refrigerar. L'absorbidor de paret humida anirà immediatament connectat a un scrubber empaquetat (*tail scrubber*) d'aproximadament el 25% de

la seva capacitat, on s'acabarà d'absorbir el gas de sortida de l'absorbidor amb l'aigua d'aliment. La configuració del sistema es mostra a la figura X-12.



**Figura X-12- Sistema d'absorció *falling film-tail scrubber*.**

Segons el sistema mostrat es podrà absorbir el gas pràcticament en la seva totalitat, ja que la operació es durà a terme de forma isoterma gracies a l'acció de la carcassa de l'absorbidor. Aquests tipus d'absorbidor està especialment recomanat per casos com el que ens ocupa en que l'absorció és fortament exotèrmica, arribant a obtenir àcid clorhídric en concentracions d'entre el 32% i el 35% en funció de la puresa del gas d'entrada tal i com es mostra a la figura X-13:



**Figura X-13. Màxima concentració d'àcid clorhídric segons la puresa del gas d'entrada.**

Com es pot apreciar a la figura X-13, no té sentit incorporar aquest tipus de sistema amb concentracions de gas inferiors al 40% màssic d'HCl. Tal i com marquen les fletxes, es necessitarà una puresa superior al 90% si es vol un corrent de sortida al 32%. Gràcies a l'efecte de la columna C-202 s'obté una puresa de 97% amb què es podrà aconseguir l'objectiu sobradament si es dissenya el sistema de forma adequada.

A nivell operacional, l'absorbidor de paret humida és el que menor pèrdua de càrrega presenta en relació a la seva eficiència. L'inconvenient és que si es fa circular el gas en contracorrent l'aparell s'inunda amb relativa facilitat, essent la velocitat màxima de circulació del gas 4,5 m/s (en tubs de 25mm). La operació en paral·lel, en canvi, permet assolir velocitats de fins a 18 m/s abans que s'inundi l'absorbidor, amb la qual cosa es dissenyarà el sistema tal i que el flux sigui co-corrent. Cal tenir present el material dels tubs, ja que haurà de resistir la corrosió de l'àcid clorhídric a la vegada que oferir una bona conductivitat tèrmica per afavorir el bescanvi de calor. Donades les circumstàncies és recomanable que els tubs siguin de grafit, tantali o vidre, essent aquest últim el més assequible. No obstant, cal recordar que el vidre és un material fràgil el qual no es podrà sotmetre a gradients de pressió o temperatura gaire elevats per evitar-ne la fractura a més que té una molt baixa conductivitat tèrmica. Donat el cas, s'empraran tubs de grafit per aquests absorbidor.

### 10.6.1 Cabals a partir de Balanços de matèria

Tenint present totes aquestes connotacions es procedeix al disseny tècnic de l'aparell. El cabal de gas a absorbir s'espera que sigui de 1550 kg/h d'una mescla de CFC-12 i HCl, estant aquest últim al 96,8%. Essent la temperatura del corrent d'uns 10°C, es vol obtenir un corrent d'HCl al 32%, prèvia absorció de fins al 5% al *tail scrubber* i operant a una pressió d'entre 1,3 i 1,5 atm màxim. Immediatament es pot trobar el cabal a la sortida i els requeriments d'aigua:

$$\text{Cabal HCl} = 0,968 \cdot 1550 \sim 1500 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Cabal de clorhídric al 32\%} = \frac{1500}{0,32} \sim 4688 \text{ kg/h}$$

$$\text{Aigua d'aliment} = 4688 - 1500 = 3188 \text{ kg/h}$$

$$\text{Cabal d'entrada a l'absorbidor al 5\%} = \frac{3188}{0,95} \sim 3356 \text{ kg/h}$$

### 10.6.2 Temperatura d'operació i necessitats de refrigeració

També es poden trobar les necessitats de refrigeració ja que es coneix la calor de dissolució del clorur d'hidrogen en aigua. Abans però, cal establir una temperatura d'operació. Per aquest motiu cal notar que el *tail scrubber* opera de forma adiabàtica, amb què el clorhídric al 5% que entra l'absorbidor de paret humida està a una temperatura determinada. Convenientment, per no haver de refredar el corrent, s'operarà a la temperatura del mateix.

$$\text{HCl absorbit a Tail Scrubber} = 3356 - 3188 = 168 \text{ kg/h}$$

Sabent que el calor d'absorció és de 2100 kJ/kg:

$$\text{Calor generat a Tail Scrubber} = 168 \frac{\text{kg HCl}}{\text{h}} \cdot 2100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg HCl}} = 352800 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 98 \text{ kW}$$

El gas d'entrada a l'Scrubber ja estarà a la temperatura de treball, per tant cal veure quin salt tèrmic suposa aquest calor generat en l'aigua d'aliment, la qual es pot suposar que estarà a 30 °C màxim. Realitzant un balanç energètic amb l'equació X-12:

$$352800 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 3188 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (T_{\text{op}} - 303\text{K})$$

D'aquí, es troba que la temperatura d'operació serà  $T_{\text{op}} = 56,5 \text{ °C}$

A tot això, la resta de HCl gas s'absorbirà de forma isoterma a l'absorbidor de paret humida. Tenint en compte el calor de dissolució, la calor a retirar serà:

$$\text{Calor a retirar} = (1500 - 168) \frac{\text{kg HCl}}{\text{h}} \cdot 2100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg HCl}} = 28 \cdot 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 777 \text{ kW}$$

Refrigerant amb aigua de torre de la qual es suposa un salt tèrmic de 30°C a 40°C, s'obté el cabal d'aigua de refrigeració:

$$28 \cdot 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = m_a \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (313 - 303)\text{K}$$

Les necessitats d'aigua de torre seran de  $m_a = 63.400 \text{ kg/h}$ , la qual cosa ens dona una idea de la magnitud de l'exotèrmia que presenta la dilució d'HCl en aigua.



### 10.6.3 Diàmetre intern i nombre de tubs

Com ja s'ha comentat anteriorment, la columna s'inunda a velocitats del gas superiors als 18 m/s, però s'ha trobat que el coeficient individual intern queda molt afavorit a velocitats superiors als 15,2 m/s. Intentant trobar una solució de compromís es farà circular el cabal de gas a l'entrada (quan hi ha més volum, per tant la velocitat serà la màxima) a uns 16 m/s. Llavors, a partir de l'equació:

$$v_g = \frac{Q_v}{N_{\text{tubs}} \cdot \frac{\pi}{4} D_i^2} \quad \text{Equació X-68}$$

On:

$v_g$  = velocitat de circulació del gas en m/s

$Q_v$  = cabal volumètric de gas en  $\text{m}^3/\text{s}$

$N_{\text{tubs}}$  = Nombre de tubs

$D_i$  = diàmetre intern en m

Es pot trobar una relació entre el nombre de tubs i el diàmetre intern dels mateixos si es calcula el cabal volumètric de gas modificant lleugerament l'equació dels gasos ideals per trobar la densitat:

$$\rho = \frac{P \cdot PM}{RT} \quad \text{Equació X-69}$$

També caldrà trobar el Pes Molecular mitjà del corrent d'entrada

$$PM = \sum y_i M_i = 0.901 \cdot 36,45 + (1 - 0.901) \cdot 120.91 = 44,81 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Aleshores:

$$\rho = \frac{131726 \text{ Pa} \cdot 44,81 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{8.31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 283 \text{ K}} = 2509,8 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \sim 2,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La qual cosa resulta en un cabal volumètric de:

$$Q_v = m \cdot \rho = \frac{1550 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{2.51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 617,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,17154 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$16 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{0,17154}{N_{\text{tubs}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2}$$

Amb aquesta relació podem configurar una taula, veient quants tubs suposarien cada diàmetre.

**Taula X – 37. Valors de diàmetre de tub per nombre de tubs.**

| <b>Diàmetre intern<br/>(mm)</b> | <b>N tubs</b> |
|---------------------------------|---------------|
| <b>15</b>                       | 61            |
| <b>17.5</b>                     | 46            |
| <b>20</b>                       | 35            |
| <b>22.5</b>                     | 27            |
| <b>25</b>                       | 22            |

A la bibliografia s'ha trobat que aquests bescanviadors acostumen a tenir com a mínim uns 40 tubs, per la qual cosa es tria un diàmetre intern de  $D_i=15\text{mm}$  tenint així 61 tubs. També s'ha pogut veure que els tubs de vidre borosilicat tenen normalment una relació Di-gruix de 3-0,7, amb la qual cosa es tindria un gruix de 3,5 mm havent escollit el Di de 15.

#### **10.6.4 Coeficient global U, àrea de bescanvi i longitud mínima**

Ara que les necessitats de refrigeració i el nombre de tubs son coneguts, cal assegurar que l'equip podrà intercanviar el calor generat, motiu pel qual es dissenyarà l'equip com si fos un bescanviador de calor destinat a l'intercanvi del cabal calorífic de 736,6 kW. D'aquesta manera, si les necessitats d'absorció obliguessin a engrandir l'equip a posteriori, es podria redimensionar sabent que el bescanvi serà satisfactori.

Llavors, la longitud dels tubs L serà la que resulti l'àrea de bescanvi total  $A_b$  suficient, calculada amb les expressions X-8 i X-10.

Primerament, però, és necessari calcular el coeficient global U i el  $\Delta T_{ml}$ . Aquest últim és un càlcul directe amb l'expressió X-9:

$$\Delta T_{ml} = \frac{27,5 - 37,5}{\ln \frac{27,5}{37,5}} = 32,24 \text{ K } \text{ó } ^\circ\text{C}$$

El Coeficient global es calcularà segons:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_{ed}} + \frac{d_e}{d_i} \cdot \frac{1}{h_{id}} + \frac{d_e}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{d_e \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2k} \quad \text{Equació X-70}$$

On:

$h_e$ =coeficient individual extern

$h_{ed}$ =aportació al coeficient extern per embrutiment (1/fouling factor)

$h_i$ = coeficient individual intern

$h_{id}$ = aportació al coeficient intern per embrutiment (1/fouling factor)

$k$ = conductivitat tèrmica del grafit 150 W/m·K

$d_e$ =diàmetre extern 18,5 mm

$d_i$ = diàmetre intern 15 mm

Tant pel fluid extern com per l'intern s'agafarà un fouling factor de 0,0002, obtenint que  $h_{id}$ =  
 $h_{ed}$ =5000 W/m<sup>2</sup>K. Els coeficients interns requeriran d'un càlcul més detallat:

#### 10.6.4.1 Càlcul del coeficient extern

Suposant que la viscositat és aproximadament constant amb la temperatura, es pot emprar la correlació:

$$\frac{h_e d_{eq}}{k} = 0,36 \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{0,33} \quad \text{Equació X-71}$$

On:

$k$ =conductivitat tèrmica de l'aigua 0,628 W/m·K a 35°C

$Re$ =nombre de Reynolds de la carcassa:  $d_e \cdot \rho \cdot v / \mu$

$Pr$ = nombre de Prandtl  $C_p \cdot \mu / k$

$d_e$ = diàmetre equivalent.

Es pot calcular ràpidament el Prandtl de l'aigua:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Equació X-72}$$

$$Pr = \frac{4,18 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,8 \cdot \frac{10^{-3} \text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{0,628 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} = 5,33$$

Pero calcular el Reynolds necessita de la velocitat de pas per carcassa de l'aigua  $v_a$ :

$$v_a = \frac{m_a}{\rho \cdot Se} \quad \text{Equació X-73}$$

I per aquest motiu s'ha de veure quin serà la secció equivalent ( $Se$ ) de pas del fluid.

$$Se = \frac{(P_t - d_e) B_s D_c}{P_t} \quad \text{Equació X-75}$$

On:

$P_t$ =Pitch dels tubs

$B_s$ = Baffle spacing

$D_c$ = Diàmetre intern de la carcassa

Es triarà un Pitch triangular, amb què  $P_t = 1,25d_e$ . El Baffle spacing podria ser, per exemple, de 0.2m i el diàmetre de la carcassa haurà de ser major que el diàmetre ocupat pels tubs tenint en compte el pitch ( $D_{ot}$ ) el qual es pot calcular segons:

$$D_{ot} = d_e \left( \frac{N_{tubs}}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} \quad \text{Equació X-75}$$

On  $K_1$  i  $n_1$  són constants. Per un pitch triangular 1-1 passos per tub i carcassa, 0,319 i 2,142 respectivament. Es pot calcular:

$$D_{ot} = 18,5 \text{mm} \left( \frac{61}{0,319} \right)^{\frac{1}{2,142}} = 214,94 \text{mm}$$

Per tal d'envoltar aquests tubs, es triarà un de  $D_c = 230 \text{mm}$ . Amb tot això, la secció equivalent:

$$Se = \frac{(23,125 \text{mm} - 18,5 \text{mm}) \cdot 0,2 \text{m} \cdot 0,23 \text{m}}{23,125 \text{mm}} = 0,0092 \text{m}^2$$

I la velocitat de pas:

$$v_a = \frac{63,397 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{995 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0092 \text{m}^2} = 6925,6 \frac{\text{m}}{\text{h}} = 1,92 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Es pot apreciar que aquesta velocitat és típica a l'estar entre 0,3 i 3 m/s. El Re de la carcassa quedarà com:

$$Re = \frac{1,92 \frac{m}{s} \cdot 995 \frac{kg}{m^3} \cdot 18,5 \cdot 10^{-3} m}{0,9 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}} = 39.269,3$$

Ja es pot conèixer el coeficient extern a falta únicament del diàmetre equivalent, el qual es pot calcular a partir de paràmetres ja coneguts sabent que el pitch és triangular:

$$d_{eq} = \frac{1,1}{d_e} (P_t^2 - 0,907 \cdot d_e^2) \quad \text{Equació X-76}$$

$$d_{eq} = \frac{1,1}{18,5 mm} (23,125^2 - 0,907 \cdot 18,5^2) mm^2 = 13,34 mm$$

Finalment, aïllant el terme  $h_e$  en l'equació X-71:

$$h_e = 0,36 \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{0,33} \cdot \frac{k}{d_{eq}} = 0,36 \cdot 39269,3^{0,55} \cdot 5,33^{0,33} \cdot \frac{0,628 \frac{W}{m \cdot K}}{13,34 \cdot 10^{-3} m} = 9900,5 \frac{W}{m^2 K}$$

#### 10.6.4.2 Càlcul del coeficient intern

Pel càlcul del coeficient intern de bescanvi de calor en un absorbidor de paret humida és necessari tenir en compte que l'aigua on s'absorirà l'HCl gas circularà per la paret interna dels tubs. Afortunadament, per aquests casos hi ha la correlació directa de McAdams, Drew i Bay:

$$h_i = 9136 \cdot \tau^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equació X-77}$$

On  $\tau$  és el cabal de líquid per unitat perifèrica de tub en kg/(m·s) i es calcula com:

$$\tau = \frac{m_w}{N_{tubs} \cdot \pi \cdot d_i} \quad \text{Equació X-78}$$

$$\tau = \frac{3188 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s}}{61 \cdot \pi \cdot 15 \cdot 10^{-3} m} = 0,3081 \frac{kg}{m \cdot s}$$

Substituint els valors obtinguts en l'Equació X-77, s'obté:

$$h_i = 9136 \cdot 0,3081^{\frac{1}{3}} = 6170,3 \frac{W}{m^2 K}$$

### 10.6.4.3 Càlcul de la U i longitud mínima

Amb tots els valors trobats es pot trobar el valor del coeficient global pel nostre sistema. Totes les unitats substituïdes estan en unitats del SI:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{9900,5} + \frac{1}{5000} + \frac{18,5 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{5000} + \frac{18,5 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{6170,3} + \frac{18,5 \cdot 10^{-3} \ln\left(\frac{18,5 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}}\right)}{2 \cdot 150}$$

Agrupant per parts (coef. extern, intern i conductivitat):

$$\frac{1}{U} = 3,010 \cdot 10^{-4} + 4,465 \cdot 10^{-4} + 1,293 \cdot 10^{-5}$$

$$U = \frac{1}{7,604 \cdot 10^{-4}} = 1315,0 \frac{W}{m^2 K}$$

Amb aquesta U, l'àrea de bescanvi serà:

$$A_b = \frac{499800 \cdot 10^3 \frac{J}{h} \cdot \frac{1h}{3600s}}{1315 \frac{W}{m^2 K} \cdot 32,24 K} = 3,275 m^2$$

La qual requerirà d'una longitud mínima de tubs:

$$L_{\min} = \frac{3,275 m^2}{61 \cdot \pi \cdot 15 \cdot 10^{-3} m} = 1,14 m$$

Aquesta longitud mínima és un valor completament orientatiu. Potser la longitud de tubs ha de ser el triple d'aquesta si es tenen en compte els fenòmens de transferència de matèria i la temperatura de la pel·lícula àcida. El càlcul per trobar la longitud definitiva es presenta al següent apartat

### 10.6.5 Longitud de tubs segons la transferència de matèria

Es dividirà l'absorbidor en 5 punts. Per cada punt es trobarà la temperatura de la pel·lícula àcida i la de l'aigua de refrigeració. Veient els canvis de temperatura i el calor alliberat entre cada punt (fixat el % d'HCl absorbit) es podrà saber la longitud entre cada punt per tal d'aconseguir retirar aquest calor. A continuació es mostra la taula amb els 5 punts, així com les taules de valors de l'equació d'Antoine per la pressió de vapor d'HCl per la temperatura i la taula d'entalpies de solució de l'àcid clorhídric.

**Taula X – 38. Punts i concentracions de l'absorbidor.**

| Punt | %HCL |
|------|------|
| 1    | 32   |
| 2    | 26   |
| 3    | 20   |
| 4    | 12   |

|   |   |
|---|---|
| 5 | 5 |
|---|---|

Taula X – 39. Paràmetres de l'equació d'Antoine per la pressió de vapor d'àcid clorhídric.

| %HCl wt | A       | B    |
|---------|---------|------|
| 2       | 11,8037 | 4736 |
| 4       | 11,64   | 4471 |
| 6       | 11,2144 | 4202 |
| 8       | 11,0406 | 3908 |
| 10      | 10,9311 | 3765 |
| 12      | 10,79   | 3636 |
| 14      | 10,6954 | 3516 |
| 16      | 10,6261 | 3376 |
| 18      | 10,4957 | 3245 |
| 20      | 10,3833 | 3245 |
| 22      | 10,3172 | 3125 |
| 24      | 10,2185 | 2995 |
| 26      | 10,1303 | 2870 |
| 28      | 10,0115 | 2732 |
| 30      | 9,8763  | 2593 |
| 32      | 9,7523  | 2457 |
| 34      | 9,6061  | 2316 |
| 36      | 9,5262  | 2279 |

Taula X – 40. Entalpies de solució d'HCl en aigua.

| Formula | HCl· nH <sub>2</sub> O | Calor de formació a 298K<br>(KJ/molHCL) | % màssic HCl |
|---------|------------------------|-----------------------------------------|--------------|
| n       | estat                  |                                         |              |
| 75      | aq                     | -165,72                                 | 2,63         |
| 50      | aq                     | -165,36                                 | 3,9          |
| 40      | aq                     | -165,1                                  | 4,82         |
| 30      | aq                     | -164,67                                 | 6,33         |
| 25      | aq                     | -164,34                                 | 7,5          |
| 20      | aq                     | -163,85                                 | 9,21         |
| 15      | aq                     | -163,03                                 | 11,9         |
| 10      | aq                     | -161,32                                 | 16,9         |
| 8       | aq                     | -160                                    | 20,2         |
| 6       | aq                     | -157,68                                 | 25,3         |
| 5       | aq                     | -155,77                                 | 28,9         |
| 4       | aq                     | -152,92                                 | 33,6         |
| 2       | aq                     | -140,96                                 | 50,3         |
| 1       | aq                     | -121,55                                 | 67           |
| 0       | gas                    | -92,31                                  | 100          |

L'esquema de càlcul iteratiu a seguir serà el següent:

- 1) Suposar temperatura de la paret àcida  $T_{sup}$
- 2) Calcular:
  - pressió parcial HCl  $p_{ac}=P \cdot y_{HCL}$
  - pressió de vapor segons Antoine:  $\log(p_{ac}^*) = A - \frac{B}{T}$
  - Flux màssic  $G_t = \frac{\text{Caball màssic HCl gas}}{\text{secció total}}$
  - Pes molecular mitjà  $PM_m = \sum_i y_i PM_i$
  - Viscositat: normalment caldria calcular-la segons la mescla gasosa. Per HCl entre 20 i 100 °C va de 0,014 a 0,017 cP. Es suposarà constant i  $\mu = 0.0155$  cP
- 3) A partir d'aquests valors, trobar el coeficient de transferència de matèria segons l'equació de Norman W.S.:  $K_G = \frac{1,654 \cdot 10^{-5}}{PM_m^{1,75}} \left( \frac{d_i G_t}{\mu} \right)$
- 4) Calcular el calor d'absorció per unitat d'àrea a partir del flux molar  $N_A$  i el calor d'absorció:
  - $N_A = K_G \cdot PM_{HCL} (p_a - p_a^*)$
  - $\Delta H_S = \Delta H_{f, x\% HCl} - \Delta H_{f, HCl gas}$
  - $\hat{q}_1 = N_A \cdot \Delta H_S$
- 5) Calcular el mateix calor tenint en compte el coeficient global de transf de calor i la temperatura de l'aigua de refrigeració:
  - $\hat{q}_2 = U \cdot \Delta T = U \cdot (T_{sup} - T_{refrig})$
  - Càlcul de  $T_{refrig}$ : pels punts 1 i 5 la temperatura de l'aigua refrigerant està fixada: 30 i 40°C respectivament. Per la resta de punts s'emprarà un balanç energètic pel seu càlcul (on  $q$  és el calor alliberat entre els punts):
 
$$q = Q - \Delta H_S \cdot \text{Caball molar HCl absorbit entre el punt d'interès i el final}$$

$$= m_a C_{Pa} (T_{refrigerant punt N} - T_{refrigerant punt N-1})$$
- 6) Si  $\hat{q}_1 = \hat{q}_2$ , la  $T_{sup}$ =Temperatura de la pel·lícula àcida en aquest punt

Seguint aquest procediment, s'ha trobat que les fraccions molars d'HCl al gas son massa elevades, la qual cosa provoca que el flux molar sigui altíssim en tota la operació i que les temperatures de la paret àcida siguin de fins a 300 °C, escalfant massa l'aigua de refrigeració a la pràctica. S'ha trobat que afegint uns 5kmol/h de gas inert en el procés, aquestes fraccions baixen, respectant la  $y=0,9$  a l'entrada a fi d'obtenir el 32% a la sortida. Es suposa que aquest fet no fa variar la velocitat del gas a l'entrada

Tenint en compte aquest fet i repetint el procediment es pot construir la següent taula:

**Taula X – 41. Punts, concentracions i temperatures de pel·lícula d'àcid i d'aigua de refrig. en l'absorbidor.**

| Punt | %HCL | temperatura paret àcida (°C) | temperatura aigua refrig (°C) | $\Delta TML$ (°C) | Calor alliberat entre punts (W) | Area (m <sup>2</sup> ) | L (m) |
|------|------|------------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------------|-------|
| 1    | 32   | 35                           | 30                            |                   |                                 |                        |       |
| 2    | 26   | 51                           | 32,9                          | 10,18             | 139137                          | 10,391                 | 2,711 |
| 3    | 20   | 61,5                         | 35,4                          | 21,86             | 256184                          | 8,913                  | 2,326 |
| 4    | 12   | 83,6                         | 38                            | 34,95             | 228946                          | 4,982                  | 1,300 |



|              |   |    |    |       |        |        |       |
|--------------|---|----|----|-------|--------|--------|-------|
| 5            | 5 | 96 | 40 | 50,62 | 111897 | 1,681  | 0,439 |
| <b>TOTAL</b> |   |    |    |       | 736163 | 25,967 | 6,775 |

Amb les temperatures de paret i els calors alliberats trobats mitjançant el procediment iteratiu, s'escriu directament a la taula el  $\Delta T$  mitjà logarítmic i, tenint en compte la U, es pot trobar l'àrea de bescanvi entre punts i, en definitiva, la longitud entre punts. Sobredimensionant la llargada total un 10%, es veu que el nostre absorbidor tindrà tubs de 7,5m de longitud.

#### 10.6.6 Absorbidor adiabàtic A-302

Per trobar l'absorbidor complementari a l'A-301 es mirarà un de catàleg, que es pugui adquirir i instal·lar directament. Per aquest fi s'empra la taula extreta de la web del proveïdor QVF d'absorbidors adiabàtics. Sabent que es vol un cabal de sortida de 3356 kg/h al 5% de clorhídric, es podria seleccionar un absorbidor com el que es ressalta a la taula.

Taula X – 42. Catàleg d'absorbidors adiabàtics de QV..

| Absorber DN | Packing height [m] | Raschig Glass Rings [mm] | max. 30% Acid Concentration [kg/h] |
|-------------|--------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 80          | 3,4                | 8                        | 19                                 |
| 100         | 3,4                | 10                       | 52                                 |
| 150         | 3,4                | 15                       | 173                                |
| 200         | 3,4                | 20                       | 395                                |
| 300         | 3,8                | 25                       | 1054                               |
| 450         | 4,4                | 40                       | 3201                               |
| 600         | 5,0                | 50                       | 6591                               |
| 800         | 5,7                | 50                       | 11676                              |
| 1000        | 6,2                | 50                       | 18080                              |

L'equip es podria sobredimensionar lleugerament pels 155 kg/h de diferència, però sobretot caldria tenir en compte que l'alçada de l'empacat ha de ser menor. Si la present a la taula serviria per una sortida al 30%, seria necessari un absorbidor d'uns 0,75-1 metres segons recomani el proveïdor. Per tal que quedi l'equip sobredimensionat, s'agafarà un DN500 i una alçada d'empacat d'1 metre.

## 10.5. Bescanviadors de calor

Tota planta necessita d'intercanvi de calor en els seus fluids, ja sigui per escalfar, refredar, evaporar o condensar. Aquest intercanvi de calor pot ser de calor sensible o de calor latent si hi ha canvi de fase.

Els bescanviadors, evaporadors, condensadors i reboilers d'aquest projecte s'han dissenyat de carcassa i tubs amb el programa ASPEN EXCHANGER DESIGN & RATING<sup>®</sup> el qual funciona segons el mètode de Kern avançat. Aquest programa funciona donant-li l'increment de temperatura dels fluids, la pressió del fluid corresponent, el cabal de fluid, factors d'embrutiment i donant-li les composicions i propietats dels fluids a les temperatures d'interès. El programa actua amb un grau de llibertat en les variables de cabal i temperatura, és a dir, de 6 variables a especificar, temperatura d'entrada i sortida de fluid fred i calent i cabals de fluid fred i calent, s'especifiquen cinc i el programa calcula l'última.

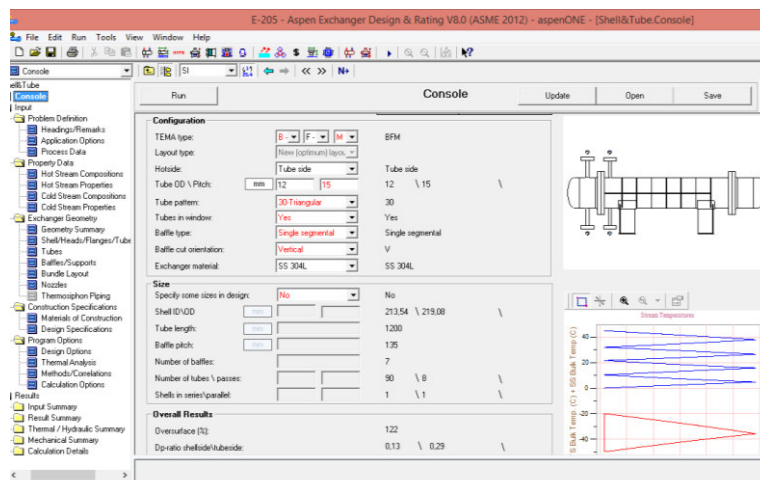
El disseny s'ha fet tenint en compte una sèrie de paràmetres per tal de tenir bescanviadors de calor coherents i funcionals.

- La relació longitud entre diàmetre ha d'estar entre 4 i 6.
- Les condensacions i evaporacions de procés succeeixen en la carcassa dels bescanviadors.
- No passar de 40°C de salt tèrmic en els fluids tèrmics.
- Les velocitats han d'estar en uns rangs determinats.
  - Líquid per tub: Líquid de procés, entre 1 i 2 m/s, màxim 4m/s si es vol evitar l'embrutiment. Aigua, entre 1,5 i 2,5 m/s.
  - Líquid per carcassa, entre 0,3 i 1 m/s.
  - Vapors: depèn de la pressió d'operació i de la densitat del gas. En el següent rang. Buit: 50-70 m/s. Pressió atmosfèrica: 10-30 m/s. Alta pressió: 5-10 m/s.

Si s'acompleixen les anteriors condicions es dona per bo el disseny.

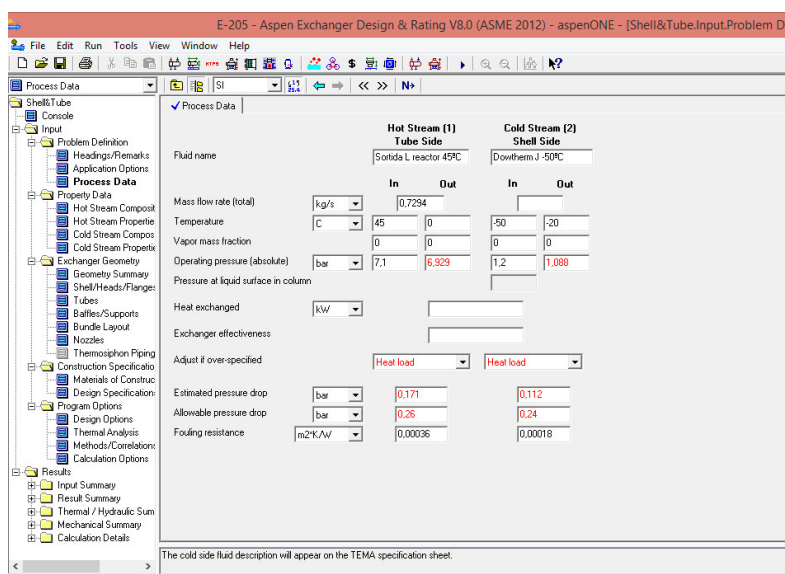
### 10.5.1 Funcionament del programa

El programa té com a pantalla d'inici la pestanya *Console* on s'especifica la geometria del bescanviador, per on circula el fluid calent, el tipus de bafles, el pitch, la orientació i el material del bescanviador.



**Figura X - 14. Primer pas per al disseny a la pestanya Console. Els tres tipus de bescanviadors que s'han dissenyat són BFM, BEM i DKU que s'especifiquen a TEMA type, que són bescanviador de carcassa i tubs amb doble pas per carcassa, bescanviador de carcassa i tubs amb un pas per carcassa i kettle reboiler amb alta pressió inclosa respectivament.**

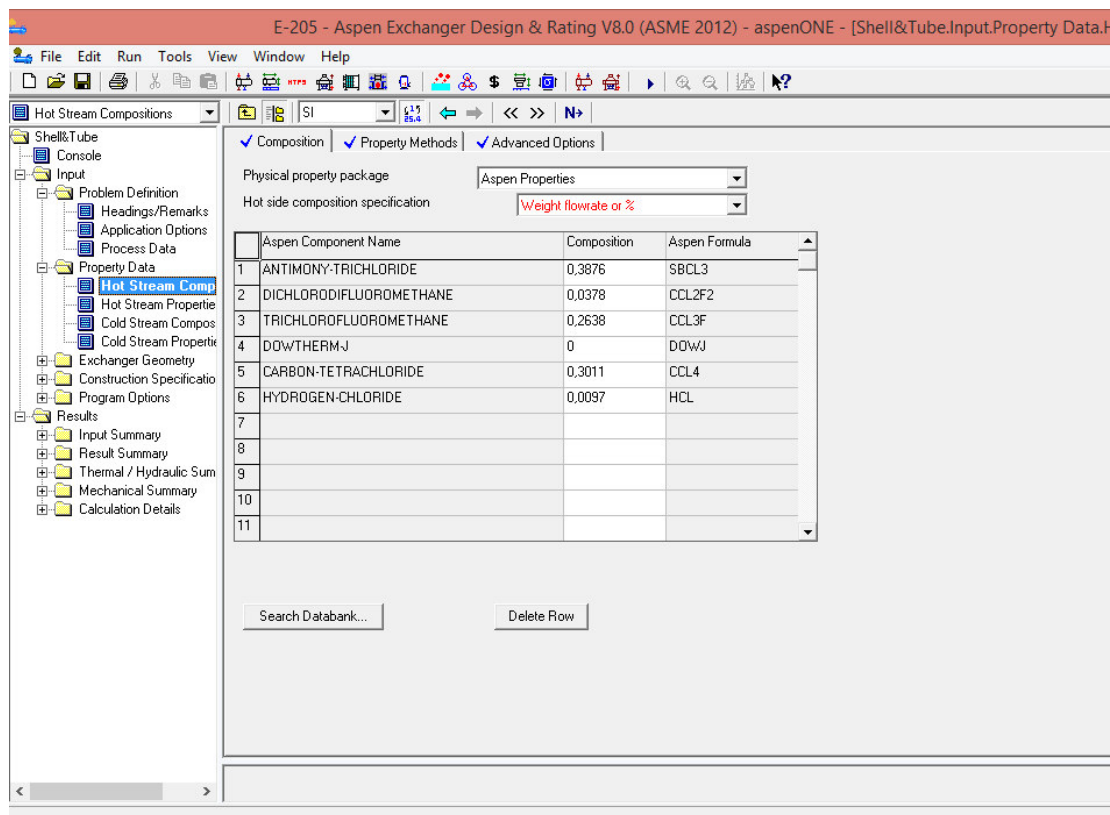
Tot seguit, a *Process Data* es posen les variables esmentades anteriorment.



**Figura X - 15. Pestanya de Process Data per el bescanviador E-205. Es pot veure com les variables que demana són cabals, temperatures, fracció vaporitzada, pressió del fluid i factors d'embrutament. Es pot veure com es deixa un grau de llibertat per el càlcul. Si és un reboiler és important la fracció vaporitzada per tal d'aconseguir la sortida de líquid i gas desitjada.**

Als fluids de procés se li ha assignat un factor d'embrutament de 0,00036 m²K/W degut a la presència de CFC's i àcids corrosius, al DOWTHERM J 0,00018 m²K/W i a l'aigua i vapors 0,0001 m²K/W segons la bibliografia.

Una vegada s'ha omplert aquest apartat correctament, es fiten les composicions dels components del fluid calent i fred.



Hot Stream Compositions

Physical property package: Aspen Properties

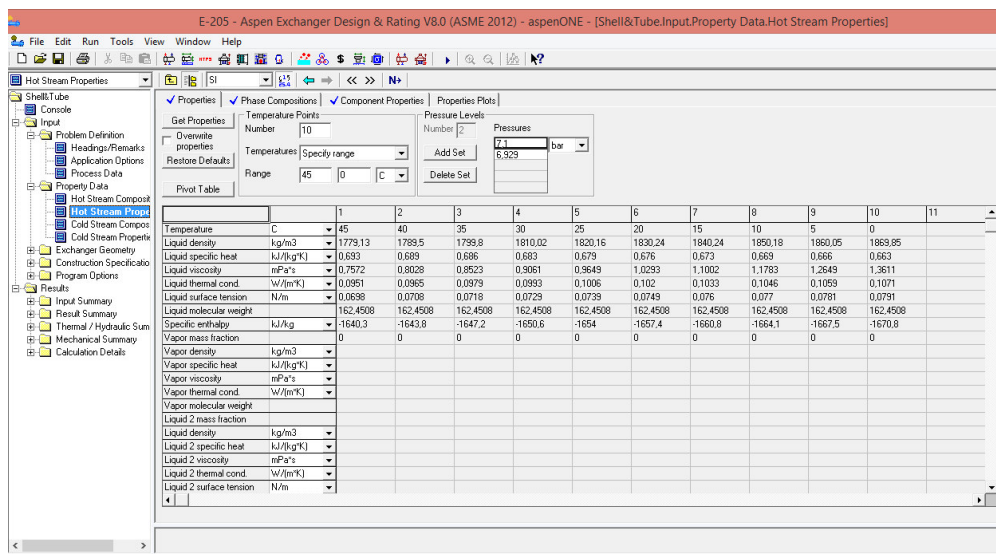
Hot side composition specification: Weight flowrate or %

| Aspen Component Name | Composition             | Aspen Formula |
|----------------------|-------------------------|---------------|
| 1                    | ANTIMONY-TRICHLORIDE    | SBCL3         |
| 2                    | DICHLORODIFLUOROMETHANE | CCL2F2        |
| 3                    | TRICHLOROFLUOROMETHANE  | CCL3F         |
| 4                    | DOWTHERM-J              | DOWJ          |
| 5                    | CARBON-TETRACHLORIDE    | CCL4          |
| 6                    | HYDROGEN-CHLORIDE       | HCL           |
| 7                    |                         |               |
| 8                    |                         |               |
| 9                    |                         |               |
| 10                   |                         |               |
| 11                   |                         |               |

Search Databank... Delete Row

**Figura X - 16. Pestanya de composició del fluid calent. Els components es seleccionen segons el paquet d'Aspen Properties.**

Un cop es tenen els fluids caracteritzats amb les seves composicions s'han de simular les propietats amb el mateix paquet de dades utilitzat al HYSYS®, és a dir PEN-ROB Vapor-Líquid-Líquid.



Hot Stream Properties

Get Properties: Temperature Points, Pressure Levels

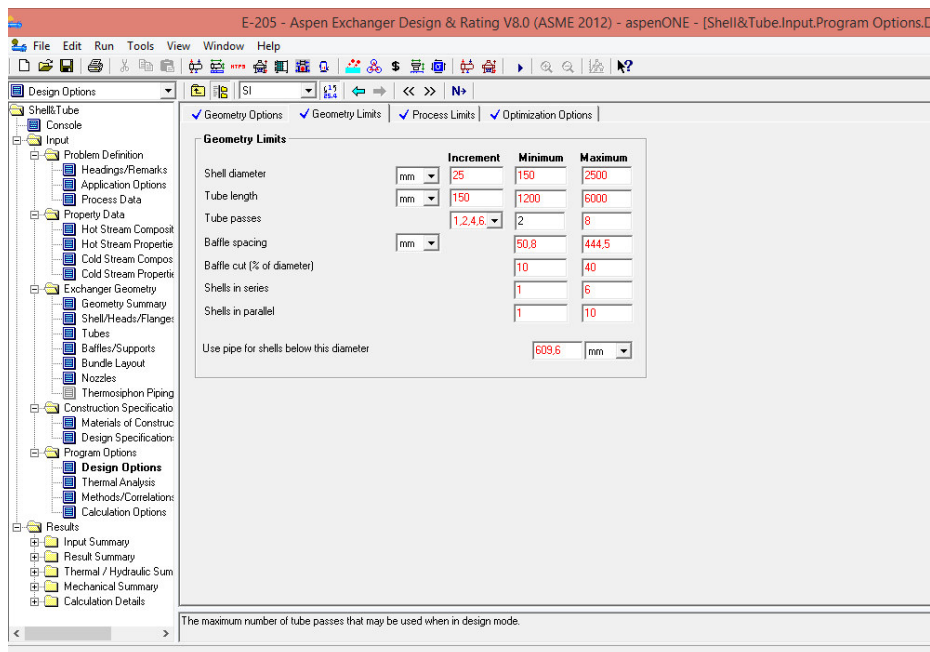
Temperature Range: 45 to 0 C

Pressure: 6.329 bar

|                                 | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11 |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|
| Temperature C                   | 45       | 40       | 35       | 30       | 25       | 20       | 15       | 10       | 5        | 0        |    |
| Liquid density kg/m3            | 1779.13  | 1759.5   | 1739.8   | 1910.02  | 1820.16  | 1830.24  | 1840.24  | 1850.18  | 1860.05  | 1869.85  |    |
| Liquid specific heat kJ/(kgK)   | 0.693    | 0.689    | 0.686    | 0.683    | 0.679    | 0.676    | 0.673    | 0.669    | 0.666    | 0.663    |    |
| Liquid viscosity mPa's          | 0.7572   | 0.8028   | 0.8523   | 0.9061   | 0.9649   | 1.0293   | 1.1002   | 1.1783   | 1.2649   | 1.3611   |    |
| Liquid thermal cond. W/(mK)     | 0.0951   | 0.0965   | 0.0979   | 0.0993   | 0.1006   | 0.102    | 0.1033   | 0.1046   | 0.1059   | 0.1071   |    |
| Liquid surface tension N/m      | 0.0638   | 0.0708   | 0.0718   | 0.0729   | 0.0739   | 0.0749   | 0.076    | 0.077    | 0.0781   | 0.0791   |    |
| Liquid molecular weight         | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 | 162.4508 |    |
| Specific enthalpy kJ/kg         | 1640.3   | 1643.8   | 1647.2   | 1650.6   | 1654     | 1657.4   | 1660.8   | 1664.1   | 1667.5   | 1670.8   |    |
| Vapor mass fraction             | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |    |
| Vapor density kg/m3             |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Vapor specific heat kJ/(kgK)    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Vapor viscosity mPa's           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Vapor thermal cond. W/(mK)      |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Vapor molecular weight          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Liquid 2 mass fraction          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Liquid 2 density kg/m3          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Liquid 2 specific heat kJ/(kgK) |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Liquid 2 viscosity mPa's        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Liquid 2 thermal cond. W/(mK)   |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |
| Liquid 2 surface tension N/m    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |    |

**Figura X - 17. Pestanya de propietats del fluid calent, on s'especifica el rang de temperatura de treball i s'obtenen les propietats clicant a *Get Properties*. Es fa el mateix procediment pel fluid fred.**

Quan ja s'han calculat les propietats es pot fer una primera simulació. Si les condicions de la relació longitud entre diàmetre o les velocitats de carcassa i/o tubs no són les òptimes es passa a retocar el procés. Si s'acompleixen les condicions, es dona com a un bon disseny.



**Figura X - 18. En la pestanya *Geometry Limits* és on es pot limitar el diàmetre de la carcassa i la longitud dels tubs per tal de que la relació estigui entre 4 i 6, en aquest cas no ha fet falta ja que la primera simulació ha sigut òptima quant a aquesta relació. També es poden tocar els passos per tub, que com es pot veure s'ha augmentat a 2 de mínim per que com més passos per tub més velocitat.**

Un cop es té aquesta relació ben acotada, si les velocitats continuen malament, s'haurà de quadrar aquesta relació amb mesures més grans si volem menys velocitat o més petites si en volem més, per que, com se sap, a menys diàmetre, més velocitat.

A més es pot tocar la mesura del diàmetre de tubs a la pestanya *Tubes* o la mida dels bafles que ens augmenta o disminueix la velocitat per carcassa a la pestanya *Baffles/Supports*.

Es torna a fer una simulació amb els nous paràmetres definits i si es satisfactori, serà correcte el disseny, si no ho és, es segueixen limitant a mode d'iteració els paràmetres anteriorment esmentats.

### 10.5.2. Exemple de càlcul per al reboiler RB-202.

El disseny de reboilers és diferent al de la resta de bescanviadors o condensadors totals. Per l'elaboració d'aquests primerament s'ha entrat a *Column Enviroment* del disseny de les columnes de destil·lació fet amb ASPEN HYSYS®. Es mira el corrent d'entrada líquida al reboiler, en aquest cas 16.200 kg/h i el corrent de sortida gasós de 13.550 kg/h. Per tant, la fracció vaportitzada és del 84% i l'altre sortida del reboiler, en fase líquida, és de 2449 kg/h. En aquest cas el fluid tèrmic, com en tots els reboilers dissenyats, actuen amb vapor saturat que condensa.

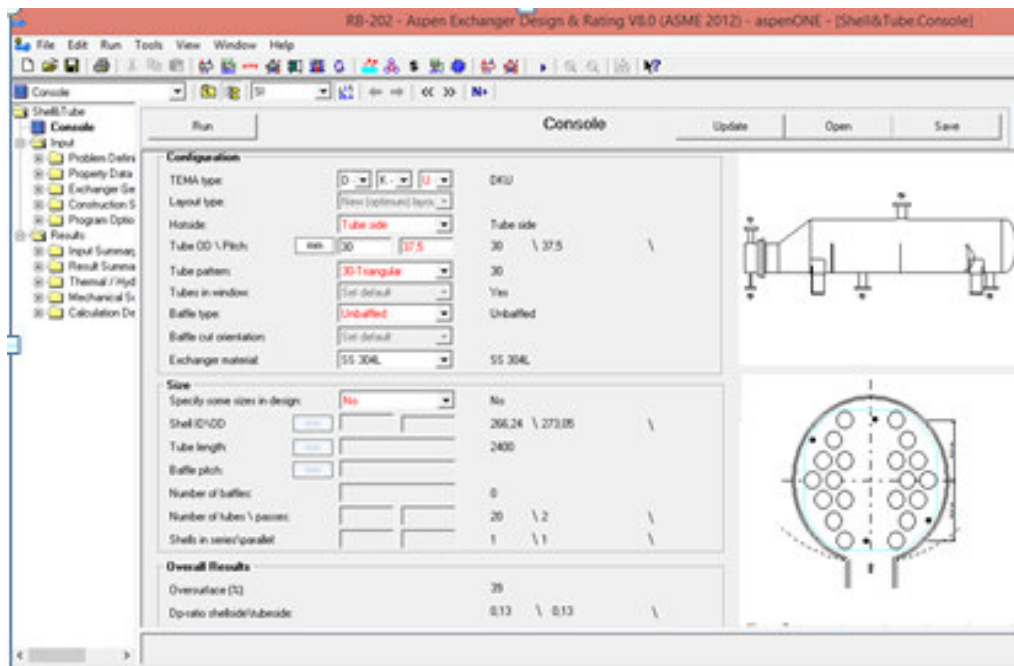


Figura X - 19. Com es pot observar s'ha especificat amb la combinació de lletres DKU al *TEMA type* de la pestanya *Console* que es tracta d'un kettle reboiler.



RB-202 - Aspen Exchanger Design & Rating V8.0 (ASME 2012) - aspenONE - [Sh...]

File Edit Run Tools View Window Help

Process Data

Shell&Tube Console Input

Problem Defini

Headings/ Applicator

Process

Property Data

Hot Stream

Hot Stream

Cold Stream

Cold Stream

Exchanger Ge

Construction S

Program Optio

Results

Input Summary

Result Summa

Thermal / Hyd

Mechanical St

Calculation De

Process Data

Fluid name Vapor de mitja serveis Cues C-202

Hot Stream (1) Tube Side

Cold Stream (2) Shell Side

|                                      | In                 | Out       | In        | Out   |
|--------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-------|
| Mass flow rate (total)               | kg/h               |           | 16200     |       |
| Temperature                          | C                  | 144,73    | 33,31     |       |
| Vapor mass fraction                  |                    | 1         | 0         | 0,84  |
| Operating pressure (absolute)        | bar                | 4,15      | 8,1       | 7,919 |
| Pressure at liquid surface in column |                    |           |           |       |
| Heat exchanged                       | kW                 |           |           |       |
| Exchanger effectiveness              |                    |           |           |       |
| Adjust if over-specified             |                    | Heat load | Heat load |       |
| Estimated pressure drop              | bar                | 0,1415    | 0,181     |       |
| Allowable pressure drop              | bar                | 0,26      | 0,5       |       |
| Fouling resistance                   | m <sup>2</sup> K/W | 0,0001    | 0,00036   |       |

Figura X - 20. En aquest cas es necessita un 0,84 de fracció vaporitzada, el que vol dir que el 84% de l'entrada del reboiler serà vapor que torna a la columna i el corrent de líquid de sortida serà de 2449 kg/h. Es pot apreciar també com es fa condensar un fluid, en aquest cas, vapor d'aigua a 4 atm i 144,73°C especificant-li primerament una fracció vaporitzada de 1 i de 0 a la sortida.

### 10.5.3. Funcionament dels bescanviadors

#### Àrea 200

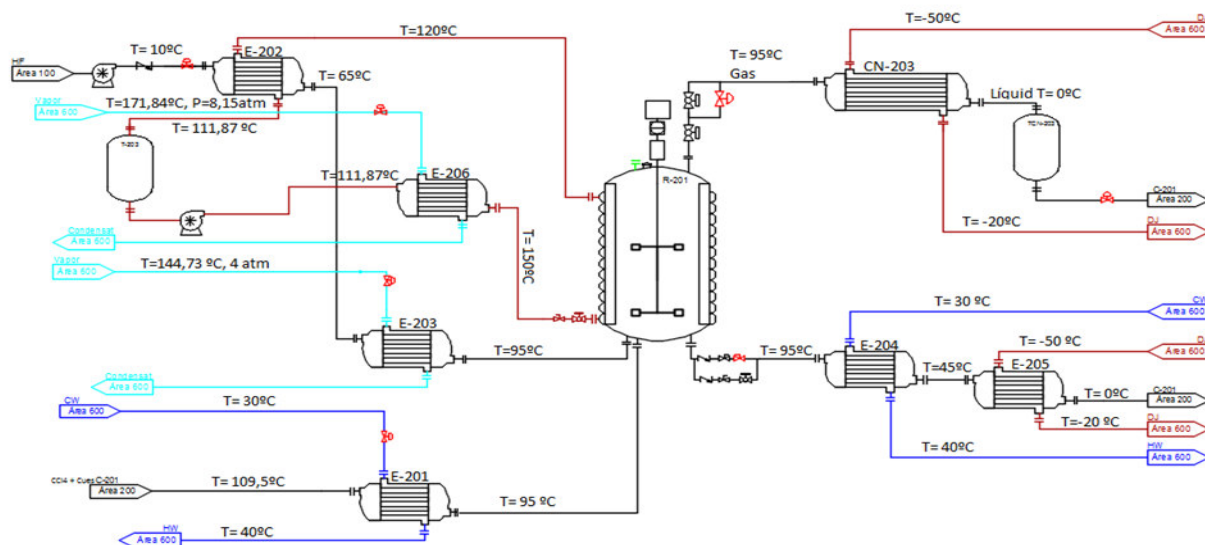


Figura X - 21. Xarxa de bescanviadors de l'àrea 200.

Com es pot apreciar en la figura anterior, l'E-201 refreda les recirculacions que venen de la columna C-201 i el  $\text{CCl}_4$  de matèries primeres amb aigua de torre un cop mesclades, que es troben a  $109,5^\circ\text{C}$  i han de passar a  $95^\circ\text{C}$ .

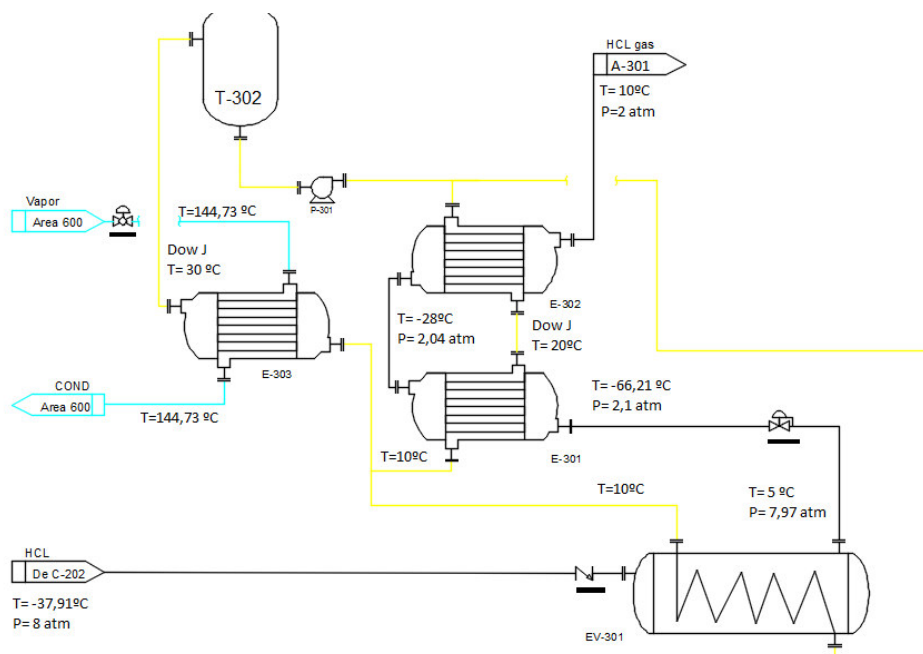
L'E-202 i l'E-203 actuen en sèrie i son per al escalfament de l'HF de matèries primeres que ve a  $10^\circ\text{C}$ . Aquest escalfament es fa amb dos etapes, primerament amb el Dowtherm J a  $120^\circ\text{C}$  de sortida del reactor, amb el qual l'escalfem fins a  $65^\circ\text{C}$ , i un posterior escalfament amb vapor a 4 atm de serveis fins als  $95^\circ\text{C}$ .

L'E-206 és un bescanviador el qual té la funció de de tancar el cicle del Dowtherm J, és a dir, el retorna a  $150^\circ\text{C}$  per a tornar a enviar-lo a la camisa del reactor.

A la sortida del reactor tenim una fase gasosa, la qual condensa al CN-203 aplicant-li un salt tèrmic de  $95^\circ\text{C}$  amb Dowtherm J a  $-50^\circ\text{C}$  que arriba a  $-20^\circ\text{C}$ . La sortida en fase líquida passa per a un primer refredament fins a  $45^\circ\text{C}$  per l'E-204 amb aigua de torre i fins als  $0^\circ\text{C}$  en l'E-205 el qual també utilitza el fluid tèrmic a  $-50^\circ\text{C}$ .

Els condensadors i reboilers ja han estat explicats al volum III de control.

### Àrea 300



**Figura X - 22. Xarxa de bescanviadors de l'àrea 300**

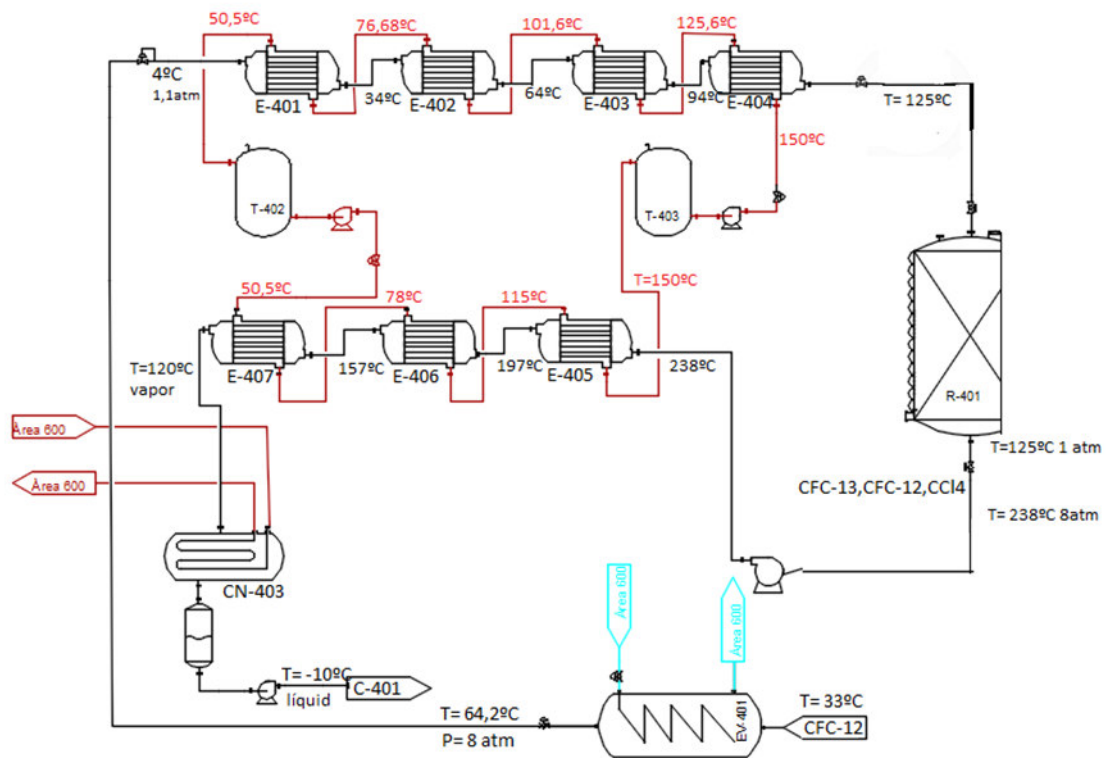


Primerament es fa passar l'HCl per un evaporador, EV-301, passant de  $-38^{\circ}\text{C}$  a  $5^{\circ}\text{C}$  i es fa amb Dowtherm J a  $30^{\circ}\text{C}$ , el qual sortirà a  $10^{\circ}\text{C}$  del bescanviador. Un cop feta aquesta evaporació, es passa per una vàlvula compressora, la qual ens passa l'HCl de 7,97 a 2,1 atm, el que suposa un refredament fins a  $-66,21^{\circ}\text{C}$ .

L'HCl a  $-66,21^{\circ}\text{C}$  i 2,1 atm passarà per l'E-301 i sortirà a  $-28^{\circ}\text{C}$ . Aquest escalfament es fa amb Dowtherm J a  $20^{\circ}\text{C}$  que ve de la sortida de l'E-302 i surt a  $10^{\circ}\text{C}$ . En l'E-302 l'oli tèrmic entra a  $30^{\circ}\text{C}$  com en l'EV-301. En l'E-302 arribem a la temperatura desitjada per l'àcid clorhídric, és a dir,  $10^{\circ}\text{C}$ .

Com el fluid tèrmic surt a  $10^{\circ}\text{C}$  tant del E-301 com del EV-301, es porta a l'E-303, el qual ens retorna el Dowtherm J als  $30^{\circ}\text{C}$  d'entrada a l'EV-301 i l'E-302 amb vapor de serveis a 4 atm.

### Àrea 400



**Figura X - 23. Xarxa de bescanviadors de l'àrea 400.**

Primerament arriba el CFC-12 com a líquid saturat i s'evapora a l'EV-401 amb vapor de serveis fins als  $64,2^{\circ}\text{C}$ . S'expandeix a 1 atmosfera amb el conseqüent refredament fins als  $4^{\circ}\text{C}$ . A partir d'aquí s'utilitzen 4 bescanviadors en contracorrent, E-401 - E-404, fins arribar als  $125^{\circ}\text{C}$  desitjats. Les temperatures d'entrada i sortida estan especificades en el diagrama anterior.

A la sortida del reactor, amb una vàlvula reductora, es comprimeix fins les 8 atm amb el conseqüent escalfament fins a 238°C i es passa per tres bescanviadors també en contracorrent, E-405 – E-407, fins als 120°C, on anirà al condensador CN-403, i sortirà a -10°C per a entrar a la C-401. Aquest condensador utilitza Dowtherm J a -50°C.

Es pot apreciar que tots els bescanviadors en contracorrent, E-401 – E-407, utilitzen el mateix oli tèrmic en un cicle tancat que va des de 150 fins 50,5°C amb dos tancs d'expansió per a poder controlar el sistema. Això es fa per tindre un reaprofitament d'aquest i no haver de gastar cada vegada oli tèrmic des de serveis.

## 10.6. Càlcul de canonades

A fi de dimensionar les canonades s'ha anat seleccionant el diàmetre. Per a fer-ho s'ha utilitzat la fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot 0.25 \cdot v}} \quad \text{Equació X-79}$$

On Q és cabal volumètric en m<sup>3</sup>/s, v la velocitat del fluid i D el diàmetre expressat en m. Per a la velocitat del fluid s'ha suposat una velocitat igual per a tots els cabals en estat líquid i una altra velocitat per a tots els cabals en estat gasós. Pel que fa als fluids líquids s'ha considerat una velocitat entre 1-2.5 m/s, i pel cas dels gasos s'han pres valors entre 15-30 m/s.

## 10.7. Tancs pulmó, de condensats, d'expansió i mescladors

### 10.7.1. Tanc de mescla T-201

#### Consideracions

El tanc pulmó T-201 ha d'estar dissenyat per emmagatzemar tetraclorometà, CFC-11 i SbCl<sub>5</sub> abans de que passin a ser un reactiu de la primera fluoració, en el reactor R-201. Aquest reactor treballarà a 95°C i 7 atmosferes. Per tant, entre el tanc pulmó i el reactor es disposarà d'un sistema de compressió tal que assegurí que el fluid entra al R-201 a 7 atm.

Sota aquestes condicions d'operació, es pretén tractar un cabal màssic total de 12.375 kg/h, que està format per la suma de 5 corrents. El primer d'ells, té un cabal màssic de 2.130 kg/h, i està compost majoritàriament per CCl<sub>4</sub> provinent dels tancs d'emmagatzematge de l'àrea 100.

El segon corrent, de 2.285 kg/h, prové de la sortida per cues de la primera columna de destil·lació, C-201, un cop s'ha separat el tetraclorometà durant la nanofiltració en l'àrea 200. El tercer corrent que acabarà al T-201, té un cabal màssic de 1.040 kg/h i conté majoritàriament  $\text{CCl}_4$ , provinent de l'última columna de rectificació C-402.

El quart corrent es tracta d'un cabal màssic de 1.300 kg/h format  $\text{SbCl}_5$ , el qual ve des del procés de nanofiltració que separa aquest catalitzador del CFC-11 i del  $\text{CCl}_4$ . L'últim flux, amb un cabal de 5.620 kg/h, es tracta del corrent de CFC-11 que se separa en la nanofiltració després de la columna C-201.

#### Capacitat i dimensions

El tanc serà dissenyat per contenir el volum de tetraclorometà durant 1 hora, així el volum que hauria de tenir el tanc T-201 és de  $8,612 \text{ m}^3$ , el qual es sobredimensionarà un 20% fins aproximar-lo a uns  $12 \text{ m}^3$ . Això permetrà tenir un volum suficientment gran com per emmagatzemar més tetraclorometà en cas de que en el reactor hi hagués algun factor que impedís la reacció.

L'alçada de la carcassa cilíndrica serà calculada tenint en compte la següent relació entre alçada i diàmetre:  $H_{\text{cil}}=2 \cdot D_{\text{cil}}$ , on  $H_{\text{cil}}$  és l'alçada de la virola i  $D_{\text{cil}}$  el seu diàmetre i utilitzant l'expressió X-1.

S'obté una alçada del cilindre de 4 m, i un diàmetre de 2 m. Els fons superior i inferior torisfèrics tindran una alçada que es calcula amb l'Equació X-2, on  $h$  és l'alçada del fons,  $D$  és el diàmetre intern dels tancs i  $\alpha=10^\circ$ .

#### Material del tanc

El tanc pulmó T-201 contindrà diferents espècies, com són  $\text{SbCl}_5$ ,  $\text{CCl}_4$  i CFC-11 per tant caldrà fer servir un material que sigui capaç de suportar la possible corrosió que originaria la forma hidratada del  $\text{SbCl}_5$  (tot i que en el procés s'evita aquesta condició a tot cost). Així, el material òptim per al T-201 serà l'AISI 316L, amb recobriment intern de tefló, que suporta l'atac corrosiu del catalitzador.

#### Pressió de disseny

El volum de líquid contingut ha d'estar a 7 atmosferes de pressió, per tant la pressió del líquid que exercirà aquest volum al tanc i decidir quina pressió de disseny s'usarà per calcular els espessors del tanc.

Tenint en compte la pressió hidrostàtica del volum contingut al tanc, es calcula la pressió d'operació com la suma de 7 atm més la pressió hidrostàtica del líquid. Es decideix que la pressió de disseny sigui de 10 bar.

#### Temperatura de disseny

El tanc pulmó T-201 operarà a 110°C, però es dissenyarà a una temperatura de 130°C.

#### Espessor dels tancs

Per calcular l'espessor necessari, s'utilitzen les equacions i directrius del codi ASME per al disseny de recipients a pressió. Segons aquest, l'espessor necessari per suportar pressions internes es calcula amb les equacions X-18 i X-19.

Per al cos cilíndric: 
$$t = \frac{145 \text{ psi} \cdot 83,33 \text{ in}}{18675 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 145 \text{ psi}} = 0,765 \text{ in} \approx 19,4 \text{ mm}$$

Per als fons torisfèrics: 
$$t = \frac{145 \text{ psi} \cdot 83,33 \text{ in} \cdot 1,54}{2 \cdot 18675 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 145 \text{ psi}} = 0,587 \text{ in} \approx 15 \text{ mm}$$

On t és l'espessor del tanc, P és la pressió de disseny, R és el radi més gran dels fons i el radi del cilindre, M és el factor de radis, tabulat pel codi ASME segons la relació R/r (on r és el radi menor dels fons torisfèrics, en aquest cas de 300 mm), S és l'esforç de tensió del material de fabricació (25% de l'esforç últim a la tensió) i E és el factor de soldadura.

Addicionant un sobrespessor de corrosió d'1 mm al cos cilíndric i els fons torisfèrics, aquests espessors s'aproximen, respectivament, a 21 mm i 17 mm. A més, cal sumar l'espessor del recobriments de tefló. Aquest recobriments serà de 2 mm. Així, l'espessor final del tanc pulmó serà de 23 mm per al cos cilíndric i de 19 mm per als fons torisfèrics.

#### Pes dels tancs

El pes del tanc s'ha de calcular tenint en compte la densitat del material utilitzat, en aquest cas l'acer inoxidable 316L té una densitat de 8000 kg/m<sup>3</sup>, i els volums útils de cada part del tanc. A les Equacions X-14, X-15 i X-20 es proposa la manera de calcular aquests pesos i el total del tanc. El pes en operació serà la suma del pes del recipient més el pes del líquid que l'ocupa.

### **10.7.2. Tanc de mescla T-202**

#### Consideracions

El tanc de mescla T-202 ha d'estar dissenyat per mesclar els dos corrents de sortida del reactor R-201 un cop s'ha aconseguit liquar el corrent de gasos. Aquest tanc ha de sortir un corrent de concentració homogènia per entrar a la primera columna de rebliment C-201. El tanc treballarà a unes 7 atm i 0 °C de temperatura. El seu volum resultarà presumiblement gran ja que el cabal de sortida serà de 9,311 m<sup>3</sup>/h, uns 13.200 kg/h en total. La composició desitjada per aquest corrent es la mostrada a la taula:

**Taula X – 43. Fraccions màssiques desitjades en el tanc de mescla T-202.**

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| <b>SbCl<sub>5</sub></b> | 0,099 |
| <b>CFC-11</b>           | 0,426 |
| <b>CCl<sub>4</sub></b>  | 0,173 |
| <b>HCl</b>              | 0,114 |
| <b>CFC-12</b>           | 0,189 |

La composició s'haurà d'aconseguir a partir dels dos cabals d'entrada, que són els de sortida del reactor R-201 de gasos i de líquids provinents del T-CN-203 i del E-205 respectivament.

#### Capacitat i dimensions

El tanc serà dissenyat per contenir el volum de líquid durant 1 hora, així el volum que hauria de tenir el tanc T-202 és de 9.311 m<sup>3</sup>, el qual es sobredimensionarà un 20% fins aproximar-lo a uns 12 m<sup>3</sup>. Això permetrà tenir un volum suficientment gran com per emmagatzemar més tetraclorometà en cas de que en el reactor hi hagués algun factor que impedis la reacció.

L'alçada de la carcassa cilíndrica també és calculada tenint en compte la següent relació entre alçada i diàmetre:  $H_{cil}=2 \cdot D_{cil}$ , i utilitzant l'expressió X-1, obtenint un diàmetre de 2 m i una alçada de 4 m. Pel que fa als fons torics, es té una alçada de 0,176 m per fons.

#### Material del tanc

El tanc de mescla contindrà diferents espècies, com són SbCl<sub>5</sub>, CCl<sub>4</sub>, CFC-11 i CFC-12 per tant caldrà fer servir un material que sigui capaç de suportar la possible corrosió que originaria la forma hidratada del SbCl<sub>5</sub> (tot i que en el procés s'evita aquesta condició a tot cost). Així, el material òptim per al T-202 serà l'AISI 316L, amb recobriment intern de tefló, que suporta l'atac corrosiu del catalitzador en cas que estigui hidratat.

#### Pressió de disseny

El volum de líquid contingut ha d'estar a 7 atmosferes de pressió, per tant la pressió del líquid que exercirà aquest volum al tanc i decidir quina pressió de disseny s'usarà per calcular els espessors del tanc, amb l'ajut de l'Equació X-1

$$H_{\text{liquid}} = \frac{12 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (2 \text{ m})^2} = 3,82 \text{ m d'alçada de líquid}$$

la qual exerceix una pressió hidrostàtica calculada amb l'Equació X-4:

$$P_{\text{liquid}} = 1.417 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3,82 \text{ m} = 53.850,43 \text{ Pa} = 0,531 \text{ bar}$$

Tenint en compte aquesta pressió hidrostàtica, es calcula la pressió d'operació com la suma de 7 atm més la pressió hidrostàtica del líquid. Aquest valor de pressió, per motius de seguretat,

#### Temperatura de disseny

El tanc pulmó T-202 operarà a 0°C, amb què es dissenyarà a aquesta temperatura.

#### Espessor del tanc

L'espessor d'aquest tanc serà igual al gruix del tanc de mescla T-201, donat que les condicions d'operació són les mateixes. Així, l'espessor de la paret del tanc serà de 19,4 mm i el dels fons torisfèrics de 15 mm.

#### Pes del tanc

El pes del tanc T-202 s'ha de calcular tenint en compte la densitat del material utilitzat, en aquest cas l'acer inoxidable 316L té una densitat de 8000 kg/m<sup>3</sup>, i els volums útils de cada part del tanc. A les Equacions X-14, X-15 i X-20 es proposa la manera de calcular aquests pesos i el total del tanc. El pes en operació serà la suma del pes del recipient més el pes del líquid que l'ocupa.

### **10.7.3. Tanc pulmó T-301**

#### Consideracions

El tanc pulmó T-301 té l'objectiu de contenir àcid clorhídric abans de que aquest sigui emmagatzemat en dipòsits IBC de HDPE d'1.25 m<sup>3</sup>. Aquest tanc ha de rebre un cabal

volumètric de 4.04 m<sup>3</sup>/h (4688 kg/h) d'HCl al 32%, a una temperatura d'aproximadament 60 °C i 1.3 bar de pressió.

#### Capacitat i dimensions

El tanc serà dissenyat per contenir uns 10 m<sup>3</sup> de volum, però de tal manera que siguin 2 m<sup>3</sup> de volum en ús. És a dir, s'intentarà que el temps de residència del tanc sigui de mitja hora, per tal de garantir que el volum de líquid en el tanc pulmó sigui un 20% de la seva capacitat total. Això permetria tenir temps suficient a l'hora d'actuar en cas de fallada o en cas d'un augment de cabal provinent de l'absorbidor.

L'alçada de la carcassa cilíndrica serà calculada amb l'expressió X-1 tenint en compte la següent relació entre alçada i diàmetre:  $H_{cil}=2 \cdot D_{cil}$ .

S'obté una alçada del cilindre de 3.71 m, i un diàmetre de 1.85 m. Els fons superior i inferior toriesfèrics tindran una alçada de 0,163 m, calculada amb l'equació X-2. Així, l'alçada total del tanc és de 4.04 metres.

#### Material del tanc

El tanc pulmó T-301 contindrà àcid clorhídric al 32%, per tant caldrà fer servir un material que sigui capaç de suportar la corrosió que produeix aquesta substància. Així, el material òptim per al tanc serà l'AISI 316L, amb recobriment intern de tefló, que suporta l'atac corrosiu dels àcids.

#### Pressió de disseny

El líquid que surt de l'absorbidor arriba a 1.3 bar de pressió. A continuació, es calcula l'alçada que tindrà el líquid en el tanc:

$$H_{liquid} = \frac{V_{liquid}}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{2 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (1.85 \text{ m})^2} = 0.744 \text{ m d'alçada de líquid}$$

la qual exerceix una pressió hidrostàtica de:

$$P_{liquid} = \rho \cdot g \cdot H_{liquid} = 1160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.744 \text{ m} = 8466.42 \text{ Pa} = 0.085 \text{ bar}$$

Tenint en compte aquesta pressió hidrostàtica, es calcula la pressió calculada de disseny, sobredimensionada un 20%:

$$P = 1.20 \cdot (1.3 \text{ bar} + 0.085 \text{ bar}) = 1.66 \text{ bar}$$

Aquest valor de pressió, per motius de seguretat, es sobredimensionarà fins a 2 bar.

#### Temperatura de disseny

El tanc T-301 operarà a uns 50 °C, però es dissenyarà a una temperatura de 70 °C.

#### Espessor dels tancs

Per calcular l'espessor necessari, s'utilitzen les equacions i directrius del codi ASME per al disseny de recipients a pressió. Segons aquest, l'espessor necessari per suportar pressions internes es calcula amb la següent equació:

$$\text{Per al cos cilíndric: } t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} = \frac{29 \text{ psi} \cdot 36.42 \text{ in}}{18675 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 29 \text{ psi}} = 0.067 \text{ in} \approx 1.8 \text{ mm}$$

$$\text{Per als fons torisfèrics: } t = \frac{P \cdot R \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} = \frac{29 \text{ psi} \cdot 36.42 \text{ in} \cdot 1.54}{2 \cdot 18675 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 29 \text{ psi}} = 0.051 \text{ in} \approx 1.3 \text{ mm}$$

Addicionant un sobreespessor de corrosió de 2 mm al cos cilíndric i els fons torisfèrics, aquests espessors s'aproximen, respectivament, a 4 mm i 3.5 mm.

#### Pes dels tancs

El pes del tanc es calcula de la mateixa manera en tots els tancs, per la qual cosa només es tindrà al final d'aquest apartat una taula resum on apareixeran els pesos totals dels tancs buits.

### **10.7.4. Tanc de mescla T-401**

#### Consideracions

Aquest tanc té la funció de contenir dos corrents de procés. D'una banda, el corrent que prové de l'àrea 200, amb 2.446,64 kg/h amb una composició de 99,99 % en CFC-12. El segon corrent, amb un cabal màssic de 303,63 kg/h i una composició de 98,06 % CFC-12, 1,49 % CCl<sub>4</sub> i 0,04 % CFC-13, prové de la mateixa àrea 400, concretament de la sortida per caps de la columna C-402.

Ambdós corrents es troben a 8 atm de pressió i a aproximadament 34 °C, en estat líquid. El tanc pulmó retindrà aquest dos corrents, que sumen en total 2,045 m<sup>3</sup>/h, abans d'enviar-los al sistema d'expansió i escalfament posterior, que pretén rebaixar la pressió fins a aproximadament 1 atm i augmentar la temperatura fins als 125 °C.

#### Capacitat i dimensions



Per tal de guarir el cabal de  $2,045 \text{ m}^3/\text{h}$  durant un temps de residència d'aproximadament mitja hora, el volum del líquid del tanc pulmó ha de ser el següent:

$$V = 2,045 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,5 \text{ h} = 1,023 \text{ m}^3$$

Per temes de seguretat, s'ha de sobredimensionar el volum un 25 %, així que el volum serà de  $1.279 \text{ m}^3$ , el 80 % del qual estarà ocupat pel líquid.

L'alçada de la carcassa cilíndrica serà calculada tenint en compte la següent relació entre alçada i diàmetre:  $H_{\text{cil}} = 2 \cdot D_{\text{cil}}$ , i l'equació X-1. Es té una alçada del cilindre de 1,87 m, i un diàmetre de 0,89 m. Els fons superior i inferior toriesfèrics tindran una alçada de 7,86 cm.

Així, l'alçada total del tanc és de 2.03 metres.

#### Material del tanc

Donat que els components que es recullen en el tanc són tetraclorometà i CFC-12 i 13, no s'espera un atac per corrosió en el tanc pulmó, tampoc perills d'explosió ni incendi. S'escull com a material de fabricació l'acer inoxidable 304.

Tenint en compte que la pressió d'operació serà de 8 bars, cal establir quina serà la pressió de disseny utilitzada per al disseny en sí del tanc.

#### Pressió de disseny

El volum que conté el tanc ha d'estar a 8 bar, si es pretén que operi en estat líquid; la pressió hidrostàtica que genera aquest volum es calcula a continuació amb l'Equació X-1.

$$H_{\text{liquid}} = \frac{1,023 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,892)^2} = 1,64 \text{ m d'alçada de líquid}$$

$$P_{\text{liquid}} = 1.348 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,64 \text{ m} = 21.687,16 \text{ Pa} = 0,22 \text{ bar}$$

Tenint en compte aquesta pressió hidrostàtica, es calcula la pressió calculada de disseny, sobredimensionada un 15%:

$$P = 1,15 \cdot (8 \text{ bar} + 0,22 \text{ bar}) = 9,86 \text{ bar}$$

Aquest valor de pressió, per motius de prevenció i seguretat, es sobredimensionarà fins a 15 bar.

#### Temperatura de disseny

El tanc pulmó T-401 operarà a 34 °C, però es dissenyarà a una temperatura de 50 °C per temes de seguretat.

#### Espessor dels tancs

Per calcular l'espessor necessari, s'utilitzen les equacions i directrius del codi ASME per al disseny de recipients a pressió. Segons aquest, l'espessor necessari per suportar pressions internes es calcula amb la següent equació:

Per al cos cilíndric: 
$$t = \frac{218 \text{ psi} \cdot 15.75 \text{ in}}{23750 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 218 \text{ psi}} = 0.171 \text{ in} = 4.34 \text{ mm}$$

Per als fons toriesfèrics: 
$$t = \frac{218 \text{ psi} \cdot 15.75 \text{ in} \cdot 1.54}{2 \cdot 23750 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 218 \text{ psi}} = 0.131 \text{ in} = 3.33 \text{ mm}$$

Aquests espessors s'aproximen, respectivament, a 6 mm i 4 mm.

### **10.7.5. Tancs d'expansió T-203, T-302, T-402 i T-403**

El disseny dels tancs d'expansió s'ha dut a terme seguint el codi ASME, el procediment del qual ja s'ha mostrat en el disseny de tancs anteriors. En conseqüència, per aquests tancs (així com pels de condensats) es mostren directament els resultats de disseny en taules enlloc de mostrar el procediment de forma exhaustiva. Cal remarcar, que aquests tancs seran esfèrics, i no toriesfèrics, amb la qual cosa el volum es calcula com a mitja esfera pels fons i com a cilindre per la virola. L'equació radi volum és la següent:

$$V_L = Q \cdot \tau = \left( \frac{4}{3} \pi r^3 + \pi r^2 \cdot r \cdot L/r \right) \quad \text{Equació X-80}$$

El temps de residència pels disseny d'aquests tancs serà d'1 hora y el L/D de 4 per afavorir la recol·lecció del goteig de condensadors i que ràpidament hi hagi alçada de líquid per poder fer cabal. Pel disseny es considerarà que els tancs estan un 50% plens, amb què:

$$V_T = \frac{V_L}{0.5} \quad \text{Equació X-81}$$

Tots seran d'AISI 304L i aniran aïllats tèrmicament (a excepció del T-302). Com a diferencia principal respecte la resta de tancs, tots tindran un tub obert per possibilitar l'expansió. A més, els equips es sobredimensionaran un 10%. Els resultats es mostren en les següents taules:

Taula X – 44. Paràmetres d'operació dels diferents tancs d'expansió.

| Tancs        | Cabal (kg/h) | Dens (kg/m <sup>3</sup> ) | Q (m <sup>3</sup> /h) | Temp (°C) | Pressió (atm) |
|--------------|--------------|---------------------------|-----------------------|-----------|---------------|
| <b>T-203</b> | 11.244       | 820                       | 13,71                 | 150       | 1             |
| <b>T-302</b> | 11.277       | 820                       | 13,75                 | 30        | 1             |
| <b>T-402</b> | 1.066        | 820                       | 1,30                  | 50        | 1             |
| <b>T-403</b> | 1.066        | 820                       | 1,30                  | 150       | 1             |

Taula X – 45. Dimensions de cada tanc.

| Tancs        | V liquid (m <sup>3</sup> ) | Vtotal (m <sup>3</sup> ) | r (m) | L (m) | D (m) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
| <b>T-203</b> | 15,08                      | 33,18                    | 0,66  | 2,64  | 1,32  |
| <b>T-302</b> | 15,13                      | 33,28                    | 0,66  | 2,65  | 1,32  |
| <b>T-402</b> | 1,43                       | 7,87                     | 0,16  | 0,63  | 0,31  |
| <b>T-403</b> | 1,43                       | 7,87                     | 0,16  | 0,63  | 0,31  |

Taula X – 46. Espessors i pressions d'operació i disseny dels tancs d'expansió.

| Tancs        | Pressió OP | P Hliquid | P total | P disseny | gruix cil. (mm) | gruix fons (mm) |
|--------------|------------|-----------|---------|-----------|-----------------|-----------------|
| <b>T-203</b> | 1          | 0,87      | 2,15    | 3         | 2               | 0,77            |
| <b>T-302</b> | 1          | 0,87      | 2,15    | 3         | 2               | 0,77            |
| <b>T-402</b> | 1          | 1,47      | 2,85    | 3         | 1,00            | 0,23            |
| <b>T-403</b> | 1          | 1,47      | 2,85    | 3         | 1,00            | 0,18            |

Taula X – 47. Tipus i espessors dels aïllaments

| Tancs        | Gruix aïll. (mm) | Aïllament     |
|--------------|------------------|---------------|
| <b>T-203</b> | 76,2             | llana de roca |
| <b>T-302</b> |                  | -             |
| <b>T-402</b> | 25,4             | llana de roca |
| <b>T-403</b> | 76,2             | llana de roca |

Taula X – 48. Pesos per component de cada tanc d'expansió.

| Tancs        | Pes cilindre (kg) | Pes dels fons (kg) | Pes total (kg) | pes operacó (kg) |
|--------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------|
| <b>T-203</b> | 268,9             | 67,9               | 336,8          | 12.705           |
| <b>T-302</b> | 271,2             | 68,3               | 339,5          | 12.744           |
| <b>T-402</b> | 9,9               | 10,5               | 20,4           | 1.193            |
| <b>T-403</b> | 9,9               | 10,5               | 20,4           | 1.193            |

### 10.7.6. Tanques de condensats T-CN201, T-CN202, T-CN203, T-CN401, T-CN402 i T-CN403

El disseny dels tanques de condensats s'ha dut a terme seguint el codi ASME, el procediment del qual ja s'ha mostrat en el disseny de tanques anteriors. En conseqüència, pels tanques de condensats es mostren directament els resultats de disseny en taules enlloc de mostrar el procediment de forma exhaustiva. Cal remarcar, que aquests tanques serà esfèrics, i no torisfèrics, amb la qual cosa el volum es calcula com a mitja esfera pels fons i com a cilindre per la virola. L'equació és la mateixa que en el cas de tanques d'expansió: X-80.

El temps de residència pel disseny d'aquests tanques serà d'1 hora y el L/D de 4 per afavorir la recollida del goteig de condensadors i que ràpidament hi hagi alçada de líquid per poder fer cabal. Pel disseny es considerarà que els tanques està un 50% plens, utilitzant-se l'equació X-81.

Tots serà d'AISI 304L i aniran aïllats tèrmicament; a més, els que puguin arribar a tenir corrosius tindran un gruix addicional d'1 mm de tefló. A més, els equips es sobredimensionaran un 10%. Els resultats es mostren en les següents taules:

**Taula X – 44. Paràmetres d'operació dels diferents tanques de condensats.**

| Tanques        | Cabal (kg/h) | Dens (kg/m <sup>3</sup> ) | Q (m <sup>3</sup> /h) | Temp (°C) | Pressió (atm) | Corrosius |
|----------------|--------------|---------------------------|-----------------------|-----------|---------------|-----------|
| <b>T-CN201</b> | 8892         | 1285                      | 6,92                  | -28       | 7             | Si        |
| <b>T-CN202</b> | 4633         | 1285                      | 3,61                  | -38       | 8             | Si        |
| <b>T-CN203</b> | 10574        | 1468                      | 7,20                  | 0         | 7             | Si        |
| <b>T-CN401</b> | 3818         | 1305                      | 2,93                  | -29       | 8             | No        |
| <b>T-CN402</b> | 703          | 1285                      | 0,55                  | -30       | 8             | No        |
| <b>T-CN403</b> | 2751         | 1517                      | 1,81                  | -10       | 8             | No        |

**Taula X – 45. Capacitat i dimensions dels tanques de condensats.**

| Tanques        | V líquid (m <sup>3</sup> ) | Vtotal (m <sup>3</sup> ) | r (m) | L (m) | D (m) |
|----------------|----------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
| <b>T-CN201</b> | 6,92                       | 15,22                    | 1,25  | 5,00  | 2,5   |
| <b>T-CN202</b> | 3,61                       | 7,93                     | 0,63  | 2,52  | 1,26  |
| <b>T-CN203</b> | 7,20                       | 15,85                    | 1,26  | 5,04  | 2,52  |
| <b>T-CN401</b> | 2,93                       | 6,44                     | 0,51  | 2,05  | 1,02  |
| <b>T-CN402</b> | 0,55                       | 1,20                     | 0,10  | 0,38  | 0,19  |

|                |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|
| <b>T-CN403</b> | 1,81 | 3,99 | 0,32 | 1,27 | 0,63 |
|----------------|------|------|------|------|------|

Taula X – 46. Pressions d'operació i disseny de cada tanc de condensats.

| Tanques        | Pressió OP<br>(atm) | P Hliquid<br>(atm) | P total<br>(atm) | P disseny<br>(atm) |
|----------------|---------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| <b>T-CN201</b> | 7                   | 2,98               | 11,48            | 15                 |
| <b>T-CN202</b> | 8                   | 0,36               | 9,61             | 15                 |
| <b>T-CN203</b> | 7                   | 0,20               | 8,29             | 10                 |
| <b>T-CN401</b> | 8                   | 0,45               | 9,72             | 15                 |
| <b>T-CN402</b> | 8                   | 2,36               | 11,91            | 15                 |
| <b>T-CN403</b> | 8                   | 0,84               | 10,17            | 15                 |

Taula X – 47. Espessors dels tancs d'emmagatzematge i temperatura de disseny.

| Gruix cilindre<br>(mm) | Gruix fons<br>(mm) | Gruix tefló<br>(mm) | Gruix aïll.<br>(mm) | Aïllament         | Temp<br>disseny (°C) |
|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| <b>10</b>              | 4,76               | 1                   | 68                  | Esc. elastomèrica | -28                  |
| <b>7</b>               | 3,66               | 1                   | 64                  | Esc. poliureta    | -38                  |
| <b>10</b>              | 4,88               | 1                   | 32                  | Esc. poliureta    | 0                    |
| <b>6</b>               | 2,97               | 0                   | 68                  | Esc. elastomèrica | -29                  |
| <b>1</b>               | 0,56               | 0                   | 68                  | Esc. elastomèrica | -30                  |
| <b>4</b>               | 1,84               | 0                   | 40                  | Esc. poliureta    | -10                  |

Taula X – 48. Pesos dels diferents components i el total de cada tanc.

| Tanques        | Pes cilindre (kg) | Pes dels fons (kg) | Pes total (kg) |
|----------------|-------------------|--------------------|----------------|
| <b>T-CN201</b> | 6130,8            | 1533,0             | 7663,8         |
| <b>T-CN202</b> | 1184,4            | 298,7              | 1483,1         |
| <b>T-CN203</b> | 6275,1            | 1577,9             | 7853,1         |
| <b>T-CN401</b> | 632,8             | 159,6              | 792,4          |
| <b>T-CN402</b> | 4,1               | 1,0                | 5,2            |
| <b>T-CN403</b> | 150,7             | 38,0               | 188,7          |

## 10.8. Serveis

En aquest apartat únicament s'inclouen els equips de serveis que es necessitaràn per planta, els calculs realitzats pel disseny d'alguns o el catàleg de compra d'altres si no han estat dissenyats directament. Aquesta informació es complementària a l'enumeració que es fa dels equips de serveis al Volum I.

### 10.8.1. Sistema de fred (chiller)

Per poder assolir segons quines temperatures baixes s'ha de tenir circuits d'aigua de *chiller*, que és un sistema d'aire condicionat capaç de refredar un fluid.

Consten de:

- Un compressor que subministra l'energia del sistema
- Condensador, el qual dissipa el calor absorbit en l'evaporador
- Un sistema d'expansió on es redueix la seva pressió el qual fa que disminueixi bruscament la seva temperatura
- Evaporador, el refrigerant a baixa temperatura i pressió passa per l'evaporador, que també absorbirà calor.

Els *chillers* tenen l'avantatge de que són controlats de forma electrònica i es pot regular el fluid a la temperatura que es vol amb més precisió. A més, al ser un circuit generalment tancat, es contamina menys i no hi ha tantes pèrdues per evaporació. La instal·lació és relativament reduïda i generalment ja vénen instal·lats gran quantitat de sensors de pressió, temperatura, flux, voltatge i corrent integrats, el que és molt útil per detectar problemes en el sistema.

Per fer l'elecció del *chiller* s'ha buscat un catàleg que s'ajustés a les necessitats requerides per la planta de producció de CFC-13. El catàleg que s'ha fet servir és el de l'empresa *GEA Refrigeración Ibérica*.

Es necessiten tres chillers per refredar l'oli tèrmic DOWTHERM J en les àrees 100, 200 i 400.

#### Àrea 100

En l'àrea 100 es necessita un *chiller* que refredi el DOWTHERM J de 0°C a 10°C per tal de mantindre l'HF de matèries primeres en les condicions de temperatura òptimes.

Per trobar els requeriments energètics que es necessiten s'ha fet el balanç tèrmic per al fluid DOWTHERM J entre 0 i 10°C.

Primerament s'ha sumat el cabal total que es necessita per els tancs d'emmagatzematge d'àcid fluorhídric i se l'ha sobredimensionat un 40% per tal de poder controlar les temperatures quan s'estigui en operació. S'ha simulat les  $C_p$  a les dos temperatures de l'interval desitjat amb *ASPEN EXCHANGER DESIGN & RATING* i s'ha fet la mitjana d'aquestes.

$$m = 13680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 6 \text{ tancs} \cdot 1,4 = 123120 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q = 123120 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,625 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ K} \cdot \frac{1}{3600 \text{ s}} = 518 \text{ kW}$$

Un cop se sap el rang de temperatures i la potència que es necessita, ja es pot anar a buscar al catàleg el *chiller* ideal per la operació.

El Sistema de refrigeració *GEA Grasso BluAstrum* pot treballar de -10 a 10°C i el volums dels seus compressors i potències disponibles en catàleg són les següents.

**Taula X - 49. Models de sistemes de refrigeració on s'especifiquen el volum del compressor, la potencia tèrmica, l'elèctrica, la longitud, alçada i pes d'aquests.**

| GEA Grasso BluAstrum |      |                                |                        |                   |                    |      |      |                |
|----------------------|------|--------------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|------|------|----------------|
| Types                |      | Capacity <sup>1)</sup><br>(kW) | Electric power<br>(kW) | EER <sup>2)</sup> | Dimensions<br>(mm) |      |      | Weight<br>(kg) |
|                      |      |                                |                        |                   | L                  | W    | H    |                |
| GEA Grasso BluAstrum | 500  | 550                            | 110                    | 5.00              | 4700               | 1000 | 2100 | 5500           |
|                      | 800  | 740                            | 153                    | 4.84              | 5000               | 1000 | 2100 | 6000           |
|                      | 900  | 880                            | 172                    | 5.12              | 5000               | 1000 | 2100 | 6500           |
|                      | 1000 | 1100                           | 217                    | 5.07              | 5000               | 1000 | 2100 | 7000           |
|                      | 1500 | 1450                           | 266                    | 5.45              | 6500               | 1200 | 2400 | 8000           |
|                      | 1800 | 1730                           | 323                    | 5.36              | 6800               | 1200 | 2400 | 8500           |

El *chiller* escollit per aquesta àrea és el que està situat en primer lloc de la taula X - 49, el qual té una potència tèrmica de 550 kW, 110kW elèctrics, longitud de 4700mm, alçada de 2100mm i 5500 kg.



Figura X – 24. Chiller GEA Grasso BluAstrum.

### Àrea 200

L'àrea 200 necessita de DOWTHERM J a  $-50^{\circ}\text{C}$  per als tres condensadors CN-201, CN-202 i CN-203 i per el bescanviador de calor E-205. Per les temperatures de sortida d'oli tèrmic a cadascun d'ells es suposa que la temperatura d'arribada al chiller es de  $-25^{\circ}\text{C}$  en el pitjor dels casos. La suma del cabal total de fluid tèrmic que necessitem serà la suma de tots els cabals de cada equip.

$$m = m_{E205} + m_{CN203} + m_{CN201} + m_{CN202} = 1724 + 48063 + 83263 + 18900 = 151950 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Es sobredimensiona un 20% per tal de tenir més fluïd disponible per si s'han de controlar els processos posteriorment amb variable manipulada el cabal d'entrada de fluïd tèrmic i es torna a aplicar el balanç tèrmic amb una mitjana de les seves calors específiques a les dos temperatures que operem trovades de la mateixa manera que en l'apartat anterior.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 151950 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,417 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 25 \text{ K} \cdot \frac{1}{3600\text{s}} = 1794 \text{ kW tèrmics}$$

Amb aquestes dades ja es pot seleccionar el sistema de refrigeració GEA Grasso FX GC/ GEA Grasso FX GCduo, el qual pot treballar fins a  $40^{\circ}\text{K}$ . Els volums dels seus compressors i potències disponibles en catàleg són les següents.



**Taula X - 50. Models de sistemes de refrigeració on s'especifiquen el volum del compressor, la potència tèrmica, l'elèctrica, la longitud, alçada i pes d'aquests.**

| GEA Grasso FX GC / GEA Grasso FX GCduo                 |      |                          |                                |                    |      |      |                |
|--------------------------------------------------------|------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|------|------|----------------|
| Types                                                  |      | Compressor               | Capacity <sup>1)</sup><br>(kW) | Dimensions<br>(mm) |      |      | Weight<br>(kg) |
|                                                        |      |                          |                                | L                  | W    | H    |                |
| GEA Grasso FX GC<br>(1 compressor)                     | 260  | GEA Grasso V300          | 277                            | 2900               | 1500 | 2300 | 3100           |
|                                                        | 400  | GEA Grasso V450          | 415                            | 3150               | 1780 | 2300 | 4200           |
|                                                        | 525  | GEA Grasso V600          | 554                            | 3580               | 1780 | 2400 | 4950           |
|                                                        | 600  | GEA Grasso V700          | 638                            | 3700               | 2000 | 2580 | 5985           |
|                                                        | 900  | GEA Grasso V1100         | 957                            | 4350               | 2200 | 2900 | 8400           |
| GEA Grasso FX GCduo<br>(DuoPack with 2<br>compressors) | 520  | GEA Grasso V300 / V300   | 302                            | 3500               | 1780 | 2300 | 5200           |
|                                                        | 650  | GEA Grasso V300 / V450   | 362                            | 3600               | 1780 | 2350 | 6350           |
|                                                        | 800  | GEA Grasso V450 / V450   | 422                            | 3800               | 1780 | 2350 | 7600           |
|                                                        | 900  | GEA Grasso V450 / V600   | 522                            | 4100               | 2000 | 2350 | 9050           |
|                                                        | 1050 | GEA Grasso V600 / V600   | 653                            | 4400               | 2000 | 2450 | 10450          |
|                                                        | 1200 | GEA Grasso V700 / V700   | 783                            | 4600               | 2200 | 2600 | 11500          |
|                                                        | 1500 | GEA Grasso V700 / V1100  | 914                            | 5100               | 2200 | 3150 | 13400          |
|                                                        | 1800 | GEA Grasso V1100 / V1100 | <b>1914</b>                    | 5500               | 2200 | 3150 | 14500          |

Com es necessiten 1794 kW tèrmics s'ha escollit el que marcat en últim lloc de la taula X - 50, Gea Grasso FX GCduo 1800, el qual té dos compressors de volum de 1100 una potència tèrmica de 1914 kW, longitud de 5500 mm, alçada de 3150 mm i 14500 kg.



**Figura X - 25. Chiller GEA Grasso FX GC/GEA Grasso FX GCduo.**

### Àrea 400

El procediment per la selecció del chiller d'aquesta àrea és exactament igual que en el cas de l'apartat anterior per l'àrea 200. En aquest cas es s'ha calculat que la temperatura d'arribada a la màquina de refrigeració és de -30°C i per tant un salt tèrmic de 20°C. Per calcular els requeriments i balanç tèrmic, s'utilitza l'Equació X-

$$m = m_{CN403} + m_{CN401} + m_{402} = 13461 + 22050 + 76 = 35587 \frac{kg}{h} \cdot 1,2 = 42704,4 \frac{kg}{h}$$

$$Q = 42704,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,405 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 20 \text{ K} \cdot \frac{1}{3600\text{s}} = 333,3 \text{ kW tèrmics}$$

Els nostres requeriments de potència són de 333,3 kW tèrmics i s'ha d'arribar a -50°C com en el cas anterior, per tant es buscarà el chiller que necessitem en la Taula X-. L'escollit serà sistema de refrigeració *GEA Grasso FX GC 400*, de 415 kW tèrmics, amb un compressor GEA Grasso V450, longitud de 3150 mm, alçada de 2300 mm i 4200 kg.

### 10.8.2. Torres de refrigeració

Quan l'aigua calenta provenint del procés (40°C) es posa en contacte amb un aire no saturat, es produeix un procés de transferència de calor de dos tipus:

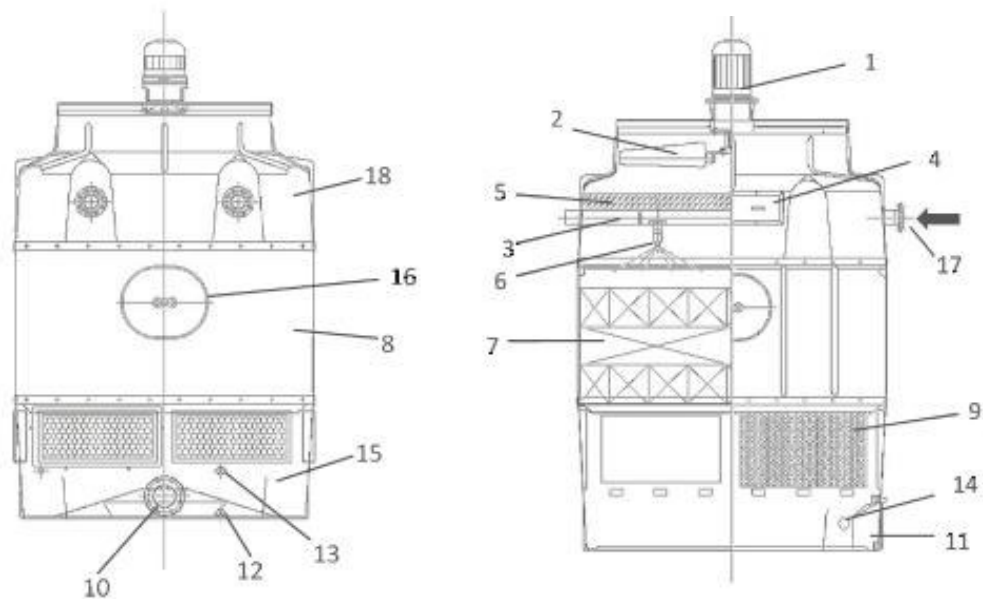
- Calor sensible: aigua-aire, degut a la diferència de temperatures.
- Calor latent: aigua-aire, degut al canvi d'estat de l'aigua.

Com l'aire no es troba saturat, part de l'aigua s'evapora fent que es refredi la mateixa a causa d'aquesta transferència de calor. Aquesta evaporació és el terme que té més pes en el procés de refredament de l'aigua.

La diferència entre la temperatura de l'aigua a l'entrada i sortida de la torre, el salt tèrmic, serà de 10°C. L'evaporació s'ha de compensar per evitar que el circuit es quedi sense aigua. L'arrossegament de gotes cap a l'exterior de la torre es minimitzarà amb reixes y tamisos. En el present cas, les pèrdues produïdes tenen un valor del 2% del cabal total, per tant s'haurà de processar un cabal d'aigua de 63.000 l/h a una temperatura de 40°C.

Per tal de fer un bon disseny ens hem situat en les condicions més desfavorables d'humitat y temperatura. La temperatura més alta del aire registrada a la província de Barcelona es 29°C. Y la temperatura de bulb humit corresponent a la humitat del gas de entrada més alta és de 24°C.

L'esquema de la torre de refrigeració es el següent:



**Figura X - 26. Esquema d'una torre de refrigeració.**

- |                           |                                           |
|---------------------------|-------------------------------------------|
| 1. Motor del ventilador   | 2. Ventilador                             |
| 3. Tubería de distribució | 4. Finestra d'accés al separador de gotes |
| 5. Separador de gotes     | 6. Toberas de pulverització               |
| 7. Rebliment              | 8. Carcasa                                |
| 9. Persianes d'aspiració  | 10. Brida de sortida                      |
| 11. Filtre                | 12. Tap de drenatge                       |
| 13. Sobreexidor           | 14. Vàlvula de flotador                   |
| 15. Safata                | 16. Porta de registre                     |
| 17. Canonada d'entrada    | 18. Caputxa                               |

El disseny de la torre s'ha plantejat a partir de l'expressió X-82

$$L \cdot dh_x = -G \cdot dH_y \quad \text{Equació X-82}$$

On:

L: Cabal de líquid

hx: Entalpia del líquid (aigua)

G: Cabal de gas

Hy: entalpia del gas (aire)

Si el sistema de referència és el líquid, desenvolupant els termes per gas y per líquid, tenint en compte la velocitat de transmissió de calor des de la interfase fins el gas obtindrem l'equació de disseny:

$$Z = \frac{L \cdot C_{pl}}{K_y P M_g \cdot a h} \int_{T_{L,s}}^{T_{L,e}} \frac{dT_L}{H_i - H_y} \quad \text{Equació X-84}$$

On:

$C_{pl}$ : calor específic del líquid

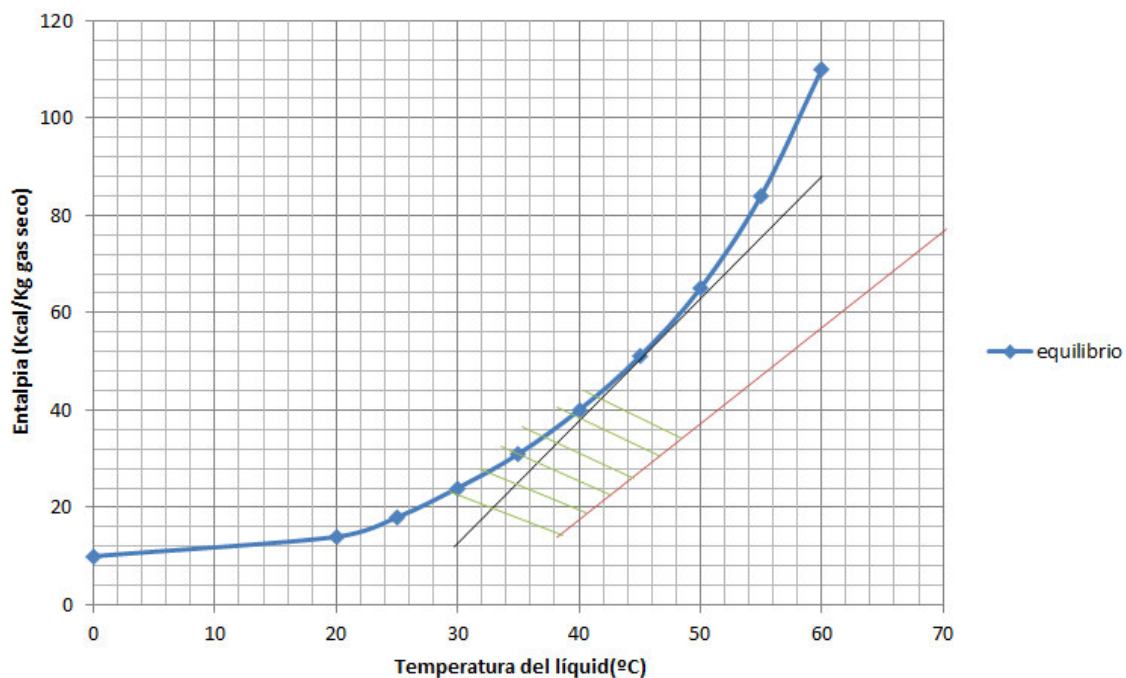
$K_y$ : coeficient de transferència de materia

$ah$ : àrea de transferència de matèria per unitat de volum de contacte.

$H_i$ : entalpia en la interfase

$H_y$ : entalpia

Per tal d'obtenir una torre de refrigeració que pugui complir les nostres necessitats farem un disseny a partir del mètode McCabe per conèixer els paràmetres més importants. Una vegada especificats tots aquests buscarem un proveïdor que ens proporcioni una torre de refrigeració adequada.



**Figura X – 27. Representació del mètode McCabe.**

La corba blau representa l'equilibri de la mescla Aire-Aigua (Okon-Tojo, pag 375). La corba vermella es la nostra línia d'operació que es la representació gràfica del balanç de matèria.

Les línies verdes representen la relació entre la línia d'operació i l'equilibri, expressat amb la següent ecuació:

$$\frac{H_y - H_i}{T_L - T_i} = \frac{-h_l}{P M_g \cdot K_y} \quad \text{Equació X-85}$$

A continuació es mostra la representació de les dades y la resolució de l'integral mitjançant un mètode numèric (Trapezis). El valor obtingut a partir del mètode dels trapezis l'utilitzem per obtenir l'alçada z segons l'equació X-84.

**Taula X – 51. Valors utilitzats en la representació del mètode McCabe de la Figura X – 24.**

| <b>T<br/>(°C)</b> | <b>Ti<br/>(°C)</b> | <b>Hy<br/>(Kcal/Kg)</b> | <b>Hi<br/>(Kcal/Kg)</b> | <b>1/(Hi-Hy)<br/>(kg/kcal)</b> |
|-------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| <b>30</b>         | 25                 | 12,7                    | 21,0                    | 0,1                            |
| <b>32</b>         | 28                 | 17,4                    | 24,1                    | 0,1                            |
| <b>34</b>         | 30                 | 21,0                    | 27,7                    | 0,1                            |
| <b>36</b>         | 33                 | 24,0                    | 29,0                    | 0,2                            |
| <b>38</b>         | 35                 | 29,0                    | 34,0                    | 0,2                            |
| <b>40</b>         | 37,5               | 32,0                    | 36,2                    | 0,2                            |

Finalment, obtindrem un valor d'alçada de torre de 8,1 m

Amb el nostre disseny aproximat a partir del mètode de MacCabe obtenim uns primers paràmetres que ens fan una idea de com seran les dimensions de la nostre torre de refrigeració. A partir de les nostres necessitats abans descrites i el nostre disseny aproximat podem manar al proveïdor a demanar la torre de refrigeració.

L'empresa *EWK: Torres de Refrigeración* atorgarà una torre que compleix amb les necessitats, de fàcil manteniment, i que té en compte la normativa sanitària vigent. El seu disseny es basa en la fiabilitat, el rendiment, la resistència a la corrosió i el respecte al medi ambient com els valors principals.

### **10.8.3. Vapor d'aigua**

Per poder subministrar vapor a la planta cal tenir com a mínim una caldera que, mitjançant la transferència de calor a pressió constant, origini el canvi de fase d'estat líquid a gasós de l'aigua. En el nostre cas, és necessari subministrar vapor d'aigua a alta pressió en unes zones i de baixa pressió en unes altres. Amb aquest objectiu, es tindrà una única caldera que treballarà a altra pressió (podent arribar fins a 35 bars) i, quan sigui necessari vapor a baixa o mitja pressió, es tindran equips de descompressió per tal de rebaixar la pressió a les necessitats específiques de la planta.

El vapor d'aigua s'utilitza per escalfar el fluid de procés mitjançant la condensació del primer; els condensats es retornaran a la caldera, on seran vaporitzats de nou. Tenint en compte que

pot ocórrer que part dels condensats es perdin durant el procés, caldrà anar reposant aquestes pèrdues.

El cabal total de vapor necessari a la planta és de 9.572 kg/h, dels quals 1.964 kg/h es necessiten a una pressió de 4 bar i els 7.608 kg/h restants a 9 bar. Per tal de satisfer aquestes necessitats de vapor, s'escull una caldera del catàleg de l'empresa **BOSCH**, en concret el model **UNIVERSAL UL-S**.

Aquest model pirotubular, que treballa amb gas per l'interior dels tubs, és capaç de produir vapor amb una potència des de 1.250 a 28.000 kg/h a una pressió de disseny de 30 bar i la temperatura màxima a la que pot operar és de 235°C, suficient per satisfer les necessitats a mitja i alta pressió a la planta.



**Figura X – 28. Caldera *UNIVERSAL UL-S*.**

Aquesta calder compta amb regulació de la caldera mitjançant PLC amb màxima transparència de dades de servei i amb un alt nivell d'eficiència, economitador integrat i materials efectius pel bon aïllament tèrmic. A més, proporciona una alta constant de vapor i qualitat de vapor, fins i tot en aquells casos on la variació de la demanda de vapor pot oscil·lar molt.

Per tal de saber la calor total que cal proporcionar a la caldera, s'ha d'especificar el cabal de vapor necessari en cadascuna de les àrees de tota la planta. En l'àrea de serveis es tindrà una única caldera que proporcionarà suficient vapor per tota la planta.

A continuació es mostra la quantitat total de vapor d'alta i aixa pressió necessari en cada àrea:

**Taula X – 53. Necessitats de vapor a tota la planta.**

| Àrea | Cabal de vapor | Cabal de vapor |
|------|----------------|----------------|
|      | a 4 bar (kg/h) | a 9 bar (kg/h) |

|                     |       |       |
|---------------------|-------|-------|
| <b>200</b>          | 1.325 | 7.551 |
| <b>300</b>          | 172   | 0     |
| <b>400</b>          | 467   | 57    |
| <b>Total</b>        | 1.964 | 7.608 |
| <b>Total planta</b> | 9.572 |       |

Amb el cabal total de vapor necessari, es pot calcular el flux calorífic necessari d'alta i baixa pressió:

$$Q = m \cdot \lambda \quad \text{Equació X-86}$$

On Q és el cabal calorífic (kW), m és el cabal màssic de vapor (kg/h) i  $\lambda$  és el calor latent de vaporització de l'aigua mitjà, calculat com la mitjana dels calors latents de vaporització de l'aigua a 4 i 9 bars (2133 i 2029,5 kJ/kg, respectivament).

$$Q = 9.572 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 2.081,25 \frac{kJ}{kg} = 5.533,8 kW$$

#### 10.8.4. Gas natural

El gas natural, font d'energia no renovable, està format per una barreja de gasos de diferent composició segons la font o jaciment d'on s'ha extret. Normalment, la composició d'aquest recurs ronda el 90-95% en metà, mentre que la resta de gasos té composicions variables de nitrogen, àcid sulfhídric, heli, età, propà, butà, etc. La major part d'aquests gasos serà separats de la mescla de gas natural pel seu baix poder calorífic. D'altres, són extrets perquè poden dipositar-se en les conduccions emprades en la distribució del gas.

Necessari per la generació de vapor a la planta, es pot calcular utilitzant la següent expressió, la qual proposa saber el cabal de gas necessari per a subministrar un calor determinat Q, en kW, en funció del seu poder calorífic inferior, PCI (kJ/kg) i la seva eficiència energètica,  $\eta$ :

$$m_{gas} = \frac{Q}{PCI \cdot \eta} \quad \text{Equació X-87}$$

$$m_{gas} = \frac{5.533,8 kW}{39.900 \frac{kJ}{kg} \cdot (0,90)} \cdot \frac{3600 s}{1 h} = 554,8 \frac{kg}{h}$$

Així, serà necessari un subministrament de 554.8 kg/h de gas natural a tota la planta.

#### ***10.8.5. Aigua descalcificada***

Com ja s'ha comentat en el primer volum del treball, l'aigua de xarxa de Sabadell es caracteritza per tenir una gran quantitat de salts dissoltes, és a dir, presentar una duresa significant d'una mitjana de 230,9 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  en els últims anys. Com que un dels usos més importants per l'aigua de xarxa és com a element de transferència de calor, les condicions a les que s'opera fan que les mínimes quantitats d'impureses contingudes en l'aigua representin problemes molt seriosos tals com les incrustacions i la corrosió.

Per tal d'evitar problemes dins de la planta, s'ha seleccionat un descalcificador per retirar les impureses que porta l'aigua de xarxa de la localitat de la casa Mare Nostrum.

El descalcificador *Dúplex Siata 230 AQC-140* es basa en un sistema de funcionament alternatiu, una columna de servei i una altra de regeneració o espera, que permet una aportació continua d'aigua les 24 hores del dia. Consta d'un programador digital *Aquacubic* que permet ajustar els cicles de regeneració. A més, inclou dues vàlvules hidràuliques de tall i un comptador emissor d'impulsos pel control del volum d'aigua tractada. La seva pressió de treball va de 2,5 a 6 bar i pot arribar a assolir una temperatura màxima de 40°C. Pel que fa les connexions amb la resta de la planta, aquest presenta un diàmetre nominal de 1 ¼". El cabal de treball d'aquest és de 5.6 m<sup>3</sup>/h consumint un total de 28 kg de sal i tenint un dipòsit de sal de 200 x 2L. La sal que s'empra com a regenerant és el clorur de sodi.

Les necessitats d'aigua descalcificada per la planta són d'uns 3188kg/h destinats a l'absorció de l'àcid clorhídric i uns 1540kg/h per les pèrdues d'aigua en el procés, és a dir, uns 5.200 kg/h de cabal (5,2 m<sup>3</sup>/h). Per aquest motiu, l'aparell seleccionat avarca un cabal de treball més gran per si en un futur hi hagués un augment de la producció.

Les dimensions especificades pel subministrador del descalcificador i un esquema de l'equip es presenten a continuació:



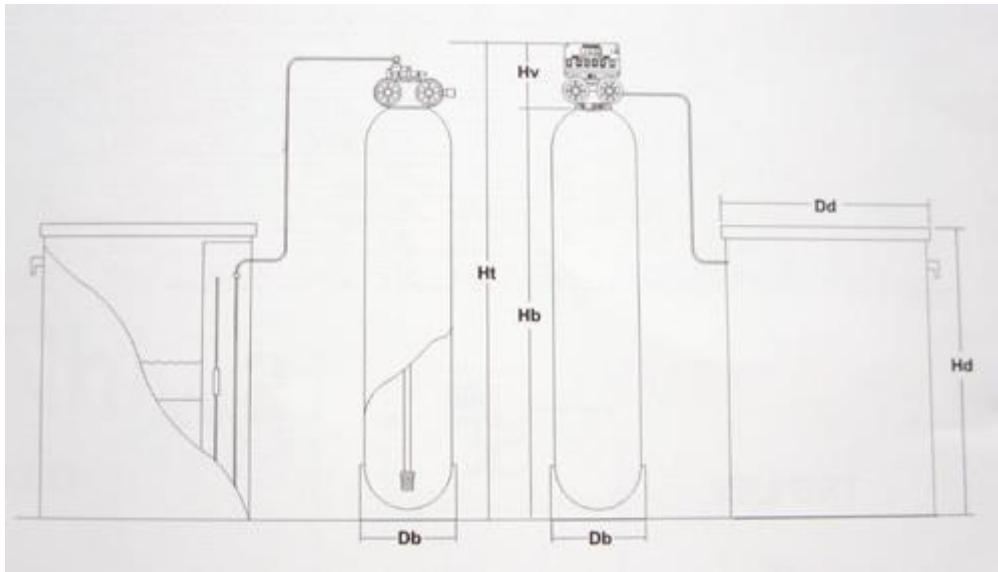


Figura X – 29. Esquema del descalcificador.

Taula X – 54. Dimensions del descalcificador.

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| Diàmetre columna (Db)   | <b>413</b> |
| Alçada columna (Hb)     | 1671       |
| Alçada controlador (Hv) | 190        |
| Alçada total (Ht)       | 1861       |
| Diàmetre tanc (Dd)      | 610        |
| Alçada tanc (Hd)        | 1140       |

### 10.8.6. Electricitat

Per tal de que la planta funcioni correctament, és imprescindible el continu subministrament d'energia elèctrica en aquesta. Els equips, enllumenat, sistemes de monitorització, etc, necessiten, en global, una gran quantitat d'electricitat, per la qual cosa l'empresa encarregada de subministrar corrent elèctric a la planta ho haurà de fer amb alta tensió.

Amb aquest objecte, es disposarà d'una estació transformadora d'electricitat a la planta, que transformi l'electricitat d'alta tensió a baixa i a 380V; la major part d'equips requereixen aquesta tensió. Quan l'energia és transformada a baixa tensió, es disposarà de caixes generals de protecció, una en cada línia de distribució en els diferents edificis de les àrees, per tal de garantir la protecció de cada línia repartidora mitjançant fusibles en el seu interior.

La instal·lació elèctrica comptarà amb línies trifàsiques (3 fases + neutra + presa de terra) de baixa tensió, que transportaran l'energia elèctrica a totes les àrees de la planta. Caldrà aïllar degudament el coure de les línies elèctriques, per tant, es recobriran amb materials aïllants com PVC. Si el cablejat passa per zones amb risc d'incendi o explosió, disposarà d'una protecció especial.

Per dimensionar les línies elèctriques, cal tenir en compte les necessitats energètiques de cada àrea, així com la simultaneïtat de l'ús d'aquesta energia: s'ha de preveure la quantitat màxima d'energia que es pot necessitar quan coincideixin el màxim nombre d'equips en funcionament.

La potència total instal·lada pot calcular-se amb la següent expressió:

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3} \quad \text{Equació X-88}$$

On:

P = potència nominal, en W.

V = diferència de potencial, 380 V.

I = intensitat de corrent, en A.

$\cos\phi = 0,85$

Aïllant i calculant la intensitat de corrent de línia en l'expressió X-88, es pot anar a la següent expressió, que relaciona la secció transversal del cablejat amb la caiguda de tensió d'una línia en concret.

$$\Delta V = \frac{L \cdot I \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3}}{K \cdot S} \quad \text{Equació X-89}$$

On:

$\Delta V$  = caiguda de tensió, en V.

K = constant del material (56 per al coure)

L = longitud de la línia, des de l'estació transformadora fins a l'edifici pertinent, en m.

S = secció transversal del cablejat, en mm<sup>2</sup>.

Al volum 7 s'inclou una taula amb els requeriments elèctrics de cada àrea de la planta. Per tal de simplificar els resultats exposats, no es farà una enumeració del consum elèctric de

cadascun dels equips, sinó que es presentarà el valor total d'energia elèctrica que cal subministrar per àrea.

#### **10.8.7. Aire comprimit**

L'aire comprimit, necessari per a l'abastiment de les vàlvules de conservació amb accionament pneumàtic, així com per la ventilació necessària en alguns equips. No es calcularà la quantitat total necessària d'aire comprimit per la dificultat del càlcul, ja que es tenen moltes vàlvules i equips que necessiten d'aquest servei, el qual serà intermitent en funció de la freqüència d'accionament de cada vàlvula. Un cop la planta estigui operant es podria fer una aproximació seguint el consum en funcionament normal de la planta.

S'utilitzarà aire a en ampolles a 200 bar de pressió, per accionar tota la instrumentació de la planta. Quan sigui necessari, la pressió es reduirà per tal d'arribar a les vàlvules o d'altres sistemes que ho necessitin.

#### **10.8.8. Nitrogen**

Caldrà introduir de forma contínua nitrogen per reduir la fracció molar d'HCl gas que entrarà a l'absorbidor A-301. Els requeriments seran d'uns 112 kg/h de gas inert que, al no absorbir-se, circularà (i permetrà un flux continuat) per l'àrea de tractament de gasos.

Aquest nitrogen, a diferència del cas de l'aire comprimit, s'introduirà des d'un tanc triat del catàleg de [www.lindeus-engineering.com](http://www.lindeus-engineering.com). Concretament, es tracta del tanc de nitrogen líquid d'uns 11 m<sup>3</sup> a 18 bar el qual té capacitat per abastir l'absorbidor durant fins a 3 setmanes de producció. Aquest tanc es reomplirà entre 3 i 4 vegades al mes pel mateix proveïdor.

### **10.9. Tractament de gasos**

Pel que fa a l'àrea 700, tal i com s'ha fet en el cas dels serveis, els equips únicament seleccionaran de catàleg tot i que aquest fet impliqui no conèixer a fons els propis equips però saber-ne la funcionalitat. Aquesta àrea només constarà d'un scrubber caustic per tal d'eliminar traces d'àcid del corrent gasos i d'una torre d'adsorció en carbó actiu per tal de retenir els hidrocarburs halogenats que es tenen en el procés: R-10, R-11, R-12 i R-13.

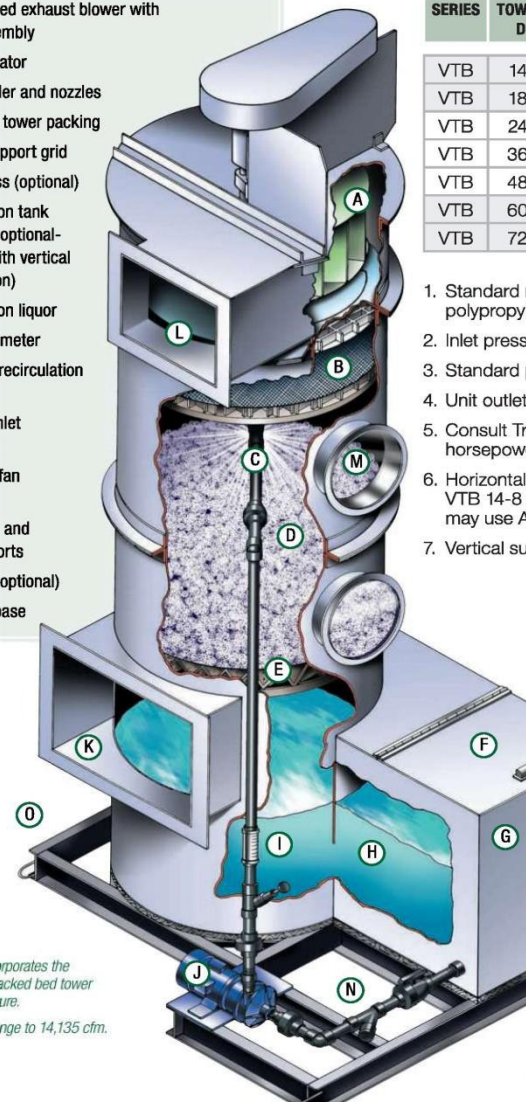
### 10.9.1 Scrubber càustic

L'elecció de l'scrubber es farà a partir del catàleg de [www.tri-mer.com](http://www.tri-mer.com), del qual s'adjunta la pàgina principal:

## Tri-Mer's VTB Series Packed Bed Scrubbers

### Light Duty Integrated Fan System

- (A) Top-mounted exhaust blower with motor assembly
- (B) Mist eliminator
- (C) Spray header and nozzles
- (D) Tri-Packs® tower packing
- (E) Packing support grid
- (F) Tank access (optional)
- (G) Recirculation tank extension (optional - required with vertical pump option)
- (H) Recirculation liquor
- (I) Liquid flowmeter
- (J) Horizontal recirculation pump
- (K) Scrubber inlet connection
- (L) Horizontal fan discharge
- (M) Packing fill and cleanout ports
- (N) Y strainer (optional)
- (O) Steel sub base



| SERIES | TOWER D | FAN SIZE | STD FAN HP | CFM MAX. | STD. RECIRC. RATE/GPM |
|--------|---------|----------|------------|----------|-----------------------|
| VTB    | 14"     | 8        | 1½         | 550      | 6                     |
| VTB    | 18"     | 10       | 2          | 880      | 9                     |
| VTB    | 24"     | 12       | 3          | 1,570    | 16                    |
| VTB    | 36"     | 18       | 7 ½        | 3,530    | 35                    |
| VTB    | 48"     | 22       | 10         | 6,280    | 62                    |
| VTB    | 60"     | 27       | 15         | 9,815    | 98                    |
| VTB    | 72"     | 33       | 20         | 14,135   | 140                   |

1. Standard material of construction – PVC or polypropylene
2. Inlet pressure typically limited to 3" w.g.
3. Standard packing depth 3'-0"
4. Unit outlet integrated with top-mounted blower
5. Consult Tri-Mer Corporation for exact fan and pump horsepower
6. Horizontal magnetic pump standard with model VTB 14-8 thru VTB 48-22. VTB 60-27 and 72-33; may use ANSI style
7. Vertical sump style pumps are also available

*This compact system incorporates the exhaust blower into the packed bed tower as a unified vertical structure.*

*VTB series applications range to 14,135 cfm.*



*8,000 cfm VTB units constructed of black polypropylene ready to ship.*

Figura X – 30. Catàleg d'scrubbers càustics d'un únic llit de rebliment

Es pot observar que el més petit de tots els models ja té una capacitat de fins a 550 CFM. A planta únicament es té un cabal continu de 0,18 m<sup>3</sup>/h cap a l'àrea 700, el qual equival a 0,11 CFM. A aquest s'hauria de sumar el cabal resultant dels ventejos puntuals de les vàlvules de seguretat i de conservació. Resulta evident que aquest tipus d'scrubbers de catàleg tenen l'objectiu de tractar cabals de procés substancialment majors, però està clar que amb el més petit ja es té suficient per operar. Pel fet de sobredimensionar, possibles ampliacions futures de planta i -sobretot- per poder ser emprat excessivament en la posada en marxa o en període de proves, es tria incorporar l'scrubber més petit del catàleg.

### 10.9.2 Torre d'adsorció de carbó actiu.

Abans d'alliberar els gasos a l'atmosfera, s'hauran de retirar els gasos CFC donat el seu més que conegut efecte degradant de la capa d'ozó. Com ja es comenta al volum I d'aquest treball, el mètode escollit és l'adsorció en carbo actiu donat que els clorofluorocarbonats amb què es treballa no son oxidables en condicions normals. De l'article *Activated carbon adsorption for treatment of VOC emissions* s'ha extret la taula X-55 per corroborar que el procediment de tractament utilitzat serà el més recomanat.

**Taula X – 55. Processos de tractament recomanat segons el residu a tractar.**

| EVALUATION OF<br>ALTERNATIVE<br>TREATMENT PROCESSES | LOW VOC LEVELS | HIGH VOC LEVELS | CONTINUOUS LOADS | INTERMITTENT LOADS | HALOGENATED ORGANICS | TEMP>150F | TEMP<150F | HIGH FLOWS | LOW FLOWS | HIGH HUMIDITY | INORGANIC PARTICLES |
|-----------------------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------|----------------------|-----------|-----------|------------|-----------|---------------|---------------------|
| ACTIVATED CARBON                                    | •              |                 | •                | •                  | •                    |           | •         | •          | •         |               |                     |
| THERMALOXIDATION                                    |                | •               | •                |                    |                      | •         |           |            | •         | •             |                     |
| SCRUBBERS                                           | •              | •               | •                |                    |                      | •         | •         | •          | •         |               |                     |
| PARTICULATE FILTERS                                 |                |                 | •                | •                  |                      |           | •         |            |           | •             | •                   |
| CATALYTIC OXIDATION                                 |                | •               | •                |                    |                      | •         |           |            | •         | •             |                     |

Afortunadament, la producció dels CFC amb que es tracta en aquest projecte està prohibida a la UE, amb el conseqüent desavantatge que comporta: no poder trobar dades sobre l'adsorció de tots 4 CFCs (R-10, 11, 12 i 13). En aquesta situació hom no pot aspirar a realitzar un disseny rigurós d'una columna d'adsorció, amb la qual cosa es prioritzarà el concepte davant el detall i s'utilitzaran valors típics. Els trobats es mostren a la taula X- 56

Taula X – 56. Valors típics per una torre d'adsorció.

| <b>Characteristics of Commercial Adsorbers</b>                               |                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Height of packing</b>                                                     | <b>3 - 9 m (10 - 30 ft)</b>                                                        |
| <b>Particle size</b>                                                         | <b>8 - 40 mesh</b>                                                                 |
| <b>Hydraulic loading</b>                                                     | <b>1.4 - 6.8 L/m<sup>2</sup> s (2 -10 gpm/ft<sup>2</sup>)</b>                      |
| <b>Residence time</b>                                                        | <b>10 - 60 min (typically 20 -30 min)</b>                                          |
| <b>Typical carbon requirements</b><br>- pretreatment<br>- tertiary treatment | <b>(in g carbon/m<sup>3</sup> wastewater)</b><br><b>60 - 200</b><br><b>25 - 50</b> |
| <b>Operating pressure</b>                                                    | <b>&lt; 20 KPa/m of bed</b>                                                        |

Gràcies a l'empresa Lenntech Co és possible saber que l'adsorció dels CFCs en qüestió millora com menor és el nombre d'enllaços C-Cl i empitjora quan aquests es substitueixen pels enllaços C-F. És per aquest motiu que l'adsorció de l'R-10 és molt bona i la de l'R-13 no especialment. En el cas de la planta que s'està dissenyant, és tindrà un cabal constant d'almenys 0,18 m<sup>3</sup>/h (sense comptar ventejos i PSVs) amb 50 kg/h de CFC-12, amb la qual cosa s'agafarà un temps de residència de 60 min per assegurar-ne l'adsorció. Seguint aquest criteri, le possibles alçades, pèrdues de pressió i diàmetres de columna es mostren a la taula X-57.

Taula X – 57. Característiques de la torre d'adsorció segons l'alçada.

| <b>H (m)</b> | <b>ΔP (kPa)</b> | <b>D (m)</b> | <b>L/D</b> |
|--------------|-----------------|--------------|------------|
| <b>1</b>     | 20              | 0,48         | 2,09       |
| <b>2</b>     | 40              | 0,34         | 5,91       |
| <b>3</b>     | 60              | 0,28         | 10,85      |
| <b>4</b>     | 80              | 0,24         | 16,71      |
| <b>5</b>     | 100             | 0,21         | 23,35      |
| <b>6</b>     | 120             | 0,20         | 30,70      |

Arribats a aquest punt, es tria recórrer a una torre de 2 metres per mostrar un compromís entre qualitat d'adsorció i pèrdues de pressió de la torre.